

施耐德电气
变频器、软起动器、电机管理控制器
电路设计宝典

施耐德电气配电电气事业部 市场部项目支持中心
2009年9月

（封面另作设计）

序言 1

序言 2

前 言

变频器、软起动器与现代工业生产和人们的日常生活联系非常紧密。在钢铁、冶金、石油开采、石油冶炼、水泥、造纸、水处理等工业行业，以及在商场、办公楼、写字楼、会议中心、住宅等民用建筑中，变频器、软起动器得以大量应用，既大大提高了劳动生产率，又满足了人们日常生活的需要。

本书以应用为目的，强调实用性，以弥补现有变频器、软起动器书籍在电路设计内容上的不足。

本书共有 8 章，第 1 章详细阐述了变频器、软起动器的基本原理，说明了变频器和软起动器功能的差异。第 2 章详细说明了变频器和软起动器各种选件的功能及选配方法，详细讲解了很多相关知识，如变频器线路接触器的作用及控制方法；变频器产生谐波电流的原因及危害，各种谐波电流抑制选件的原理及功能差异；变频器产生电磁干扰的原因、危害及抑制选件；变频器输出产生过电压的原因及危害，各种 dv/dt 抑制选件的原理及功能差异；变频器选配制动能量释放选件的原因及选配方法等。通过这些内容，便于从应用的角度，从本质上掌握变频器、软起动器各种选件的功能、选配依据和使用方法。为便于读者思考并掌握相关知识，第 1 章和第 2 章留有思考题。第 3 章以施耐德电气的变频器 ATV21、ATV61/ATV71 和软起动 ATS48 为例，详细分析了变频器、软起动器一次电路和二次电路设计中的各种常见错误，指出了错误设计导致的后果，并给出了正确的设计。第 4 章分析了变频器、软起动器招标技术规范书中常见的错误描述，并给出了正确的描述。本书还提供了大量实用应用图：第 5 章——《变频器、软起动器及电机管理控制器标准应用一次、二次图》，第 6 章——《变频器、软起动器特殊应用方案》，第 7 章——《变频器、软起动器 PLC 恒压供水、污水处理方案》以及典型的《冷站 DDC 控制原理图》。这些应用方案一定正确、一定科学、一定合理，供广大电气设计人员和电气工程技术人员参考。第 8 章为附录，其中附录 1-3 提供了变频器、软起动器招标技术规范书范本，供读者参考选用；附录 4 是常见负载的分类方法；附录 5 是思考题参考答案。

本书特别适用于刚接触变频器、软起动器设计的年轻设计师和工程技术人员，同时可供广大电气设计师和电气工程人员参考。

限于作者水平有限，书中错误和不足之处在所难免，欢迎广大读者批评指正，作者不胜感激。

李利

施耐德电气（中国）投资有限公司

市场部 项目支持中心

2009 年 9 月

公司邮箱：li-lawrence.li@cn.schneider-electric.com

目 录

1. 变频器、软起动器基本原理	I -1
1.1 变频器基本原理	I -1
1.2 软起动器基本原理	I -3
1.3 变频器、软起动器的区别	I -5
2 变频器、软起动器选件功能说明	II -1
2.1 变频器选件功能说明	II -1
2.1.1 变频器主回路接触器	II -1
2.1.2 变频器进线侧谐波电流抑制选件	II -2
2.1.3 变频器出线侧 dv/dt 抑制选件	II -10
2.1.4 变频器 EMC 滤波器	II -22
2.1.5 变频器制动能量释放选件	II -23
2.1.6 变频器其它选件	II -26
2.2 软起动器选件功能说明	II -27
2.2.1 进线接触器和旁路接触器	II -27
2.2.2 快速熔断器	II -28
2.2.3 进线电抗器	II -28
2.2.4 通讯模块	II -29
2.3 变频器、软起动器主要选件总结	II -30
2.3.1 变频器主要选件	II -30
2.3.2 软起动器主要选件	II -32
3 施耐德电气变频器、软起动器一次图常见错误设计	III -1
3.1 施耐德电气变频器一次图常见错误设计	III -2
3.1.1 施耐德电气变频器 ATV21 一次图常见错误设计	III -2
3.1.2 施耐德电气变频器 ATV61 一次图常见错误设计	III -5
3.1.3 施耐德电气变频器 ATV71 一次图常见错误设计	III -8
3.2 施耐德电气软起动器 ATS48 一次图常见错误设计	III -9
3.3 施耐德电气变频器、软起动器二次图常见错误设计	III -12
3.3.1 施耐德电气变频器 ATV21 二次图常见错误设计	III -13
3.3.2 施耐德电气变频器 ATV61/71 二次图常见错误设计	III -18
3.3.3 施耐德电气软起动器 ATS48 二次图常见错误设计	III -26
4 变频器、软起动器招标技术规范书注意事项	IV -1
4.1 变频器招标技术规范书注意事项	IV -1
4.2 软起动器招标技术规范书注意事项	IV -6

5 施耐德电气变频器、软起动器、电机管理控制器典型应用一次、二次图	V
5.1 施耐德电气变频器 ATV61 典型应用一次、二次图	V- I
5.2 施耐德电气变频器 ATV21 典型应用一次、二次图	V- II
5.3 施耐德电气变频器 ATV71 典型应用一次、二次图	V-III
5.4 施耐德电气软起动器 ATS48 典型应用一次、二次图	V-IV
5.5.1 施耐德电气电机管理控制器 Tesys T 典型应用一次、二次图	V- V- I
5.5.2 施耐德电气电机起动控制器 Tesys U 典型应用一次、二次图	V- V- II
6 施耐德电气变频器、软起动器特殊应用方案	VI
6.1 15KW 离心风机 ATV61 变频控制电气原理图（带消防备用电路）	VI- I
6.2 15KW 离心风机、或离心泵 ATV21 变频器控制电气原理图（带备用电路）	VI- II
6.3 18.5KW 风机正反转 ATV61 变频控制电气原理图	VI-III
6.4 160KW 风机正反转 ATS48 软起动控制电气原理图	VI-IV
6.5 双速风机 ATS48 软起动控制电气原理图	VI- V
6.6 3×55KW 消防栓泵两用一备 ATS48 软起动控制电气原理图	VI- VI
6.7 3×11KW 自动喷淋泵两用一备 ATS48 软起动控制电气原理图	VI- VII
7 施耐德电气变频器、软起动器工程应用方案	VII
7.1 恒压供水变频器、软起动器 PLC 控制系统应用方案	VII- I
7.2 水处理变频器、软起动器 PLC 控制系统应用方案	VII- II
7.3 2×479KW 螺杆水冷冷水机组冷站 DDC 控制原理图	VII-III
8 附录	VIII-1
附录 1 变频器招标技术规范书（适用于工业离心风机、离心泵）	VIII-1
附录 2 变频器招标技术规范书（适用于建筑离心风机、离心泵）	VIII-5
附录 3 软起动器招标技术规范书	VIII-7
附录 4 负载分类	VIII-9
附录 5 思考题参考答案	VIII-12

1 变频器、软起动器基本原理

1.1 变频器基本原理

（交-直-交型）变频器的理论基础为“面积等效原理”：即冲量（窄脉冲面积）相等而形状不同的窄脉冲，加在具有惯性的同一环节上，其效果基本相同。这里所说的“效果基本相同”，是指环节的输出响应波形基本相同。将一系列电压脉冲的宽度按正弦规律进行调制，加在电机绕组端，回路中电流波形为正弦波。

如图 1-1，a)、b)、c) 所示的三个形状不同的窄脉冲：a) 为矩形脉冲，b) 为三角脉冲，c) 为正弦脉冲，它们的面积（即冲量）都相等，将它们加在具有惯性的同一环节上时，其输出响应基本相同。

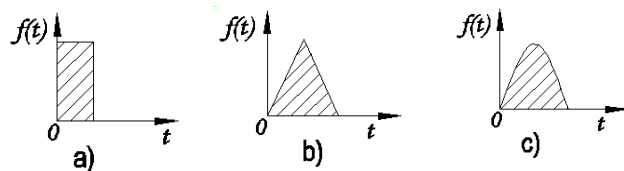


图 1-1 三种波形：a)矩形脉冲 b)三角脉冲 c) 正弦脉冲

常见的正弦波脉宽调制（SPWM），是指脉冲幅值相等，脉冲宽度按正弦规律变化，而和正弦波等效的 PWM 波形。这里所说的等效，是指这些矩形波脉冲和相应的正弦波部分面积相等。如图 1-2 所示，将一系列按 SPWM 法则调制的电压脉冲加在电机端，回路中的电流波形是正弦波。

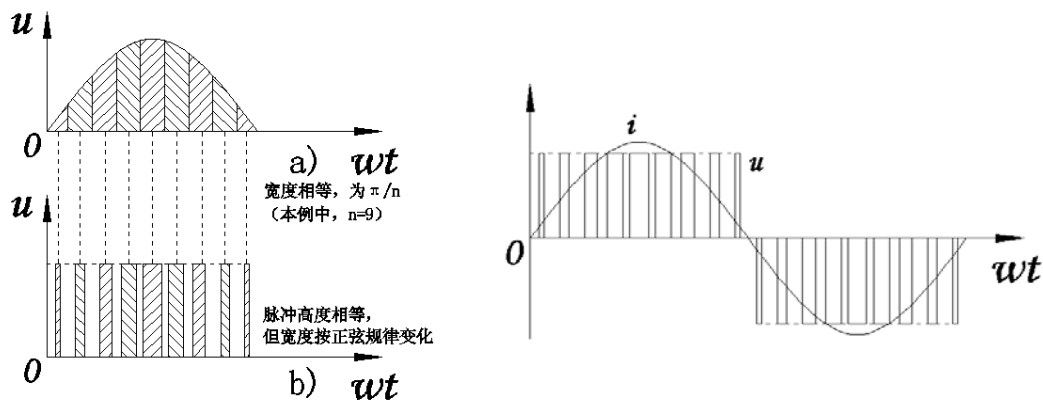


图 1-2 正弦波脉宽调制（SPWM）波形

以上就是变频器的基本原理。

交-直-交型变频器的主回路原理图见图 1-3。

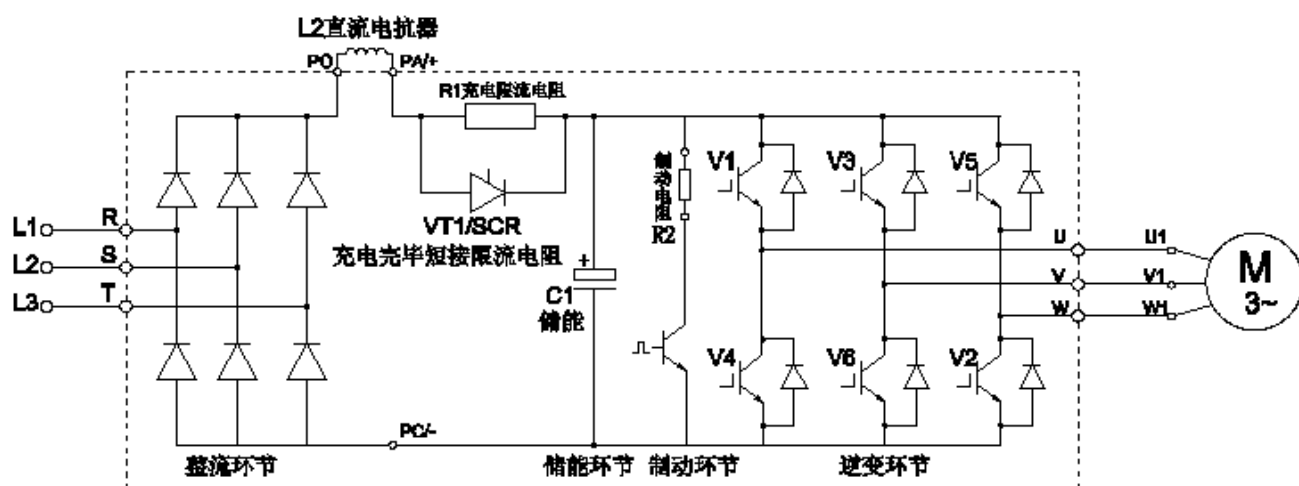


图 1-3 交-直-交型变频器的主回路原理图

“面积等效原理”深刻揭示了变频器的本质。交-直-交型变频器需要利用二极管或晶闸管将三相正弦波电压整流为直流，加上利用电容稳压储能，所以其输入侧一定会产生谐波电流。

交-直-交型变频器的输出电压是矩形脉冲，在脉冲前后沿 dv/dt （即电压变化率）非常大，所以其输出一定会产生过电压。

交-直-交型变频器输入部分——整流环节产生的谐波电流，和输出部分——逆变环节产生的矩形脉冲电压会产生电磁干扰，所以变频器需要 **EMC** 滤波器减小其产生的电磁干扰，同时减小其运行环境中的电磁干扰对变频器自身的影响。

当电动机运行在电动机状态时，电能由变频器传递到电动机；当电动机处于发电机或电磁制动状态时，电能由电动机反馈到变频器。由于变频器输入侧采用了具有单向导通性的二极管或晶闸管，反馈回的能量不能输送回电网，从而使得变频器内部直流母线电压升高。所以变频器一般需要制动晶体管（或制动单元）+制动电阻（或起重电阻）构成制动电路，将这些能量以热能的形式释放；或需要能量反馈单元，将其逆变成交流电反馈回电网。如果这部分能量不能及时有效释放，势必会使得变频器内部直流母线电压持续升高，以至于将内部储能电容击穿，从而使得变频器损坏或爆炸，造成严重后果。

1.2 软起动器基本原理

软起动器本质上是一种降压起动器，其基本原理是通过降低电机端的起动电压，以减小起动电流和机械冲击，并实现对电机平滑起动。常见的软起动器采用“削波”来实现对电机的降压起动。

一般说来，软起动器主回路由 6 个单向晶闸管或 3 个双向晶闸管构成（见图 1-4）。起动过程中，通过控制晶闸管的触发角 α 由大变小，使得输出电压逐渐增加。当 $\alpha = 0$ 时，晶闸管输出全电压。软起动器起动过程中的“削波原理”见图 1-5。软起动器一般需要旁路运行，这样既可延长软起动器晶闸管的使用寿命，还可保护晶闸管免受浪涌电压的冲击而损坏。

软起动器本质上是一种降压起动装置，由于软起动器没有改变输出电压的频率，所以在降压起动的同时，一定会降低起动转矩。一般情况下，软起动器可将起动电流限定在额定电流的 3 倍或 4 倍以内，起动转矩一般为额定转矩的 0.2~0.4 倍。

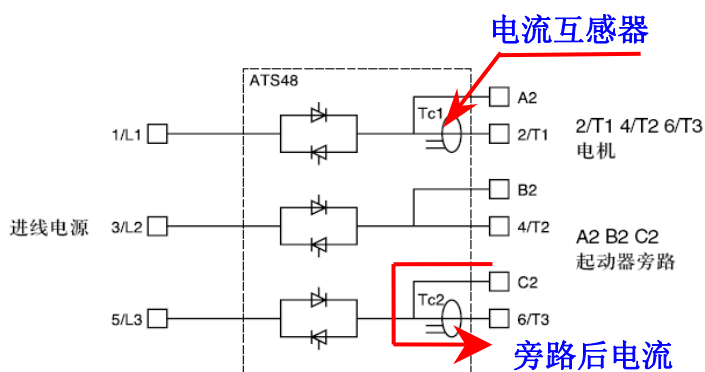


图 1-4 软起动器（ATS48）主回路原理图

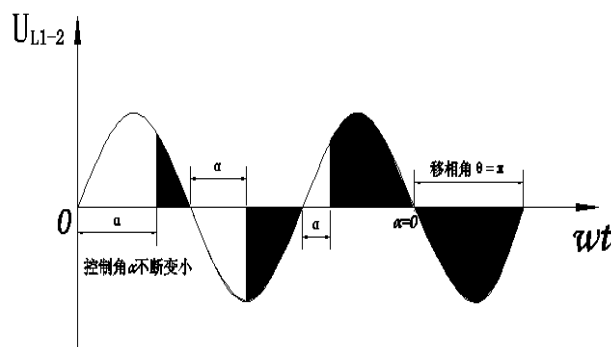


图 1-5 软起动器输出电压控制原理图

图 1-4 是施耐德电气公司的软起动器 ATS48 主回路结构，需要注意的是，旁路接触器的下端头必须接软起动器的旁路端子 A2-B2-C2，而不能接到电机电缆接线端子 2/T1-4/T2-6/T3。否则软起动器起动结束切换到旁路运行时，报“缺相”故障，从而不能运行。原因由读者思考。

软起动器的控制类型有多种，目前市面上常见的软起动器有电压型、电流型和转矩控制型。电压型和电流型软起动器可归为传统型软起动器。虽然各种类型的软起动器的基本技术原理都相同，但因为控制对象不一样，所以各种软起动器性能差别很大。

电压型、电流型软起动器由于控制对象是电压或电流，所以控制简单，性能较差，如存在起动电流过大，电机发热严重，起动速度曲线为二次曲线，软起、软停性能差等弊端，并且大多旁路后需要另加热继电器做过载保护。

而转矩控制型软起动器以电机输出的电磁转矩为控制对象，加速转矩在整个起动过程中可以保持为恒值，所以起动速度可以线性增加到额定值，从而大大减小机械冲击，有效消除机械应力，可最大限度延长机械设备的使用寿命。软停时，力矩控制可有效地控制电机转速线性减小，以消除水锤效应，从而延长水泵、阀门的使用寿命。

转矩控制（TCS）是施耐德电气公司的专利技术，**ATS48** 是一款典型的转矩控制型软起动器，这款软起动器性能优良、功能发达。理想负载为离心风机、离心泵等变转矩负载。因其过流能力很强，对于不要求调速的普通恒转矩负载，如活塞泵、罗茨风机、传送带等，也可以选用 **ATS48** 作为驱动器。

1.3 变频器、软起动器的区别

变频器、软起动器有本质区别，本节从 6 个方面做了探讨。

(1) 基本原理不同

变频器的基本原理是“面积等效原理”，即用一组矩形脉冲电压来代替一个正弦波电压。

软起动器的基本原理是“削波降压原理”，即通过输出不完整的正弦波以减小起动电压，从而减小起动电流。

由于变频器、软起动器的基本原理不相同，这就从根本上决定了变频器、软起动器技术实现不同。

(2) 技术实现（主电路结构）不同

变频器主电路为交-直-交结构，即由整流环节（二极管或晶闸管）、稳压储能电容、制动环节（有的变频器无）、逆变环节（IGBT）等几部分组成。详见《图 1-3 交-直-交型变频器的主回路原理图》。

软起动器主电路一般是 3 个双向晶闸管或 6 个反并联的晶闸管。详见图 1-4 软起动器（ATS48）主回路原理图》。

软起动器原理和主电路结构就决定了：软起动器自身不可能有制动晶体管（或制动单元）和制动电阻这样的选件。

思考题：

1. 变频器在待机状态下，是否会产生谐波电流？为什么？软起动器在待机状态下，是否会产生谐波电流，为什么？
2. 变频器供电的空气开关的脱扣器能否选择用于配电的热磁型脱扣器，为什么？
3. 为什么说软起动器的原理和主电路结构决定了其不可能加制动单元和制动电阻器这样的选件？

(3) 输出电压波形不同

变频器输出电压波形为矩形脉冲，所以在脉冲的前后沿， dv/dt （电压变化率，即电压对时间的微分）会非常大，这是变频器输出产生过电压的根本原因。

变频器输出电缆（电机电缆）超过 50 米（对于 400V@3 相供电而言，下同），需要加装电机电抗器；超过 300 米，需加装正弦滤波器。具体选配时应查阅所用变频器的技术资料。

软起动器在起动过程中输出电压是有缺口的正弦波形，其 dv/dt （电压变化率，即电压对时间的微分）为余弦，形式不变。所以对于软起动器，没有“输出过电压”一说。软起动器起动完毕，输出电压与输入电压相同，为完整的正弦波形。

思考题 4：软起动器输出是否需要加装选件？

(4) 起动电流不同

根据“面积等效原理”，变频器输出回路中的电流波形为正弦波。

在起动过程中，起动电流由很小的值（通常可认为初始起动电流 $I_s \leq 0.1I_e$ （额定电流）），逐渐增大到额定值。实际运行中，如果变频器输出没有加装选件（电机电抗器或正弦滤波器），电流波形会有一定的失真，有很多毛刺，比较杂乱，可参考图 2-7。如果加装了电机电抗器或正弦滤波器，回路中电流会是很标准的正弦波，尤其是加装了正弦滤波器，电流的正弦波形几乎看不到一点毛刺或失真。

软起动器输出回路电流波形与电压波形相同：在起动过程中，输出回路中的电流波形是有缺口的正弦波，起动电流由较大的值（一般情况下，起动电流 $I_s = 3 \sim 4I_n$ （ I_n 是软起动器的额定电流）），逐渐减小到额定值；起动过程结束后，是完整的正弦波。

(5) 起动转矩不同

变频器起动频率一般是 **0Hz**，但起动转矩 $T_s \geq 0.5T_n$ （额定转矩），起动过转矩能力一般可达 **1.3~1.7 T_n** （额定转矩）。如果是高端变频器（如施耐德电气公司的**ATV71** 系列变频器）过转矩能力可达 **2.2 T_n** 。**ATV71** 这样高端的变频器加编码器闭环控制，还可以在 **0Hz**时输出连续的额定转矩（即静止转矩）。

软起动器起动时由于降低了起动电压，而电压频率并有改变，所以一定会降低起动转矩，一般情况下， $T_s=0.4T_n$ 。即便是采用突跳起动（持续 **100ms**，即 **2** 个周波内输出全电压），也没有从根本上提高起动转矩。

(6) 调节的参数不同

电机的转速 $n=n_0 \times (1-s) = 60 \times f \times (1-s) / p$ （ f 为频率， s 为转差率， p 为电机的极对数），变频器调节的参数为频率 f ，是效率最高的一种调速方式。

而软起动器调节的参数为转差率 s ，是效率最低的一种调速方式。

在工程应用中，第（3）、（4）、（5）条非常有价值，需要予以特别关注。

思考题：

5. 有这样一个真实的工程案例：变压器容量 $S_e=500kVA$ ，向一台水泵供电，水泵功率 $P_e=75KW$ 。水泵为单泵，进出口水管没有安装阀门。后来项目改造，水泵功率增大为 $P_e=220KW$ 。

设计师开初选用了软起动器。

您认为设计选用软起动器是否合理？

结果想了一切可想的办法，都未起动成功。后来换成变频器，便毫无悬念地起动成功。为什么？

6.一个定量泵泵站，变压器容量 $S_e=800\text{kVA}$ ，共 3 台水泵，每台水泵功率为 220KW 。若 3 台泵均选用软起动器，是否正确？为什么？

表 1-1 变频器—软起动器区别一览表

序号	类 别	变 频 器	软 起 动 器	备 注
1	基本原理	“面积等效”原理，即用一组矩形脉冲电压代替一个完整的正弦波电压。	“削波降压”原理，即通过输出不完整的正弦波电压以减小起动电压，从而减小起动电流。	
2	主电路结构 (技术实现)	由整流二极管（或晶闸管）、稳压储能电容、制动电路（有的变频器无）、逆变管（IGBT 或其它全控型器件）等几部分组成。	一般是 3 个双向晶闸管或 6 个反并联的晶闸管	变频器输入侧一定会产生谐波电流，但软起动器只有在起动和软停（制动停机）过程中才会产生谐波电流，起动完毕旁路运行，软起动器不再产生谐波。
3	输出电压波形	矩形脉冲	起动过程中电压波形是有缺口的正弦波，起动完毕旁路运行，则输出完整的正弦波。	变频器输出侧一定会产生过电压。过电压的大小与运行频率、变频器开关频率、电缆长度和电缆类型有关。变频器输出电压不能通过模拟式电压表测得。
4	输出电流波形	（不规整的）正弦波	与电压波形相同	变频器输出侧加装了电机电抗器或正弦滤波器，尤其是后者，电流正弦波形会很规整。
5	起动转矩	起动转矩 $T_s \geq 0.5T_n$ （额定转矩），起动过转矩能力一般可达 $1.3 \sim 1.7T_n$ （额定转矩）	一定会减小起动转矩，一般情况下， $T_s = 0.4T_n$ 。即便是采用突跳起动也没有从根本上提高起动转矩。	
6	调节的参数	调节 f ，效率高。	转差率 s ，效率低。	

2.变频器、软起动器选件功能说明

2.1 变频器选件功能说明

变频器的 5 类选件需要关注，变频器选型时要特别留意。

1. 主回路接触器；
2. 进线侧谐波电流抑制选件，共有 3 种：交流电抗器（又称线路电抗器或进线电抗器）、直流电抗器（安装在变频器内部直流母线上，可参考图 1-3）、无源滤波器；
3. 出线侧 dv/dt 抑制选件，共有 2 种：电机电抗器、正弦滤波器；
4. 电磁干扰抑制选件：EMC 滤波器；
5. 制动能量释放选件，共有 2 种：制动晶体管（或制动单元）+制动电阻（或起重电阻），能量回馈单元。

2.1.1 变频器主回路接触器

严格意义上讲，主回路接触器不属于变频器的选件。但该接触器的用法非常重要，使用不当，不仅仅是变频器的功能得不到充分应用，而且会对变频器的使用寿命造成严重影响，甚至将变频器烧毁，故在这里详细论述。

施耐德变频器主回路接触器的作用都相同：提高安全性和可靠性。该接触器受变频器的故障触点控制，在故障时受控断开，形成一个可靠的物理断点。变频器的起停控制严禁控制此接触器。

其他厂家的变频器如果采用了进线接触器，也应遵循这样的原则，比如有的厂家，在其《变频器用户手册》上印刷有这样的警示字样：“起停控制严禁控制接触器的通断”。

既然变频器主回路接触器是为提高安全性和可靠性而选配，所以一般情况下该接触器不是必需的。所谓必需，就是：如果不采用该接触器：1.违反了相关标准；2.会造成严重后果。显然，对于一般应用，变频器主回路不采用接触器，既没有违反相关标准，也不会造成严重后果。如果安全等级要求较高，主回路加了进线接触器，在故障时可切断此接触器，以便在主回路形成一个可靠的物理断点。而对于一般的安全等级要求，可以直接切断变频器的运行信号来停止变频器的输出。

对于变频器 **ATV71**，如果用于驱动罗茨风机、活塞泵、螺杆机等简单的恒转矩机械，主回路接触器建议加在变频器出线侧，这样控制电路会很简单。如果用于电梯、起重等运行工况很严酷的复杂机械，主回路接触器应加在进线侧。具体控制电路可参考本书的应用图。

ATV61 和 **ATV21** 驱动的负载一般是离心风机、离心泵等这些简单机械，主回路接触器应加在出线侧，这样控制电路会很简单。具体控制电路可参考本书的应用图。

2.1.2 变频器进线侧谐波电流抑制选件

变频器进线侧选件的首要功能是抑制变频器产生的谐波电流。如果变频器输入侧谐波电流总畸变率不满足 **IEC** 标准的要求：**THDI $\leq 48\%$** ，则为错误的设计。

谐波是在工频 **50Hz** 基波上叠加的杂波，用傅立叶级数展开，这些杂波可以分解为其频率相对于工频基波频率（**50Hz**）的整数倍，称为该谐波的次数，例如，**100Hz** 的波形为 **2** 次谐波，**150Hz** 的波形为 **3** 次谐波，**250Hz** 的波形为 **5** 次谐波等。

在深入讨论变频器进线侧选件及其功能之前，我们先对变频器主电路结构做说明。

目前市面上的变频器一般都是交-直-交型变频器（见图 2-1），整流环节（一般是二极管或晶闸管）将三相正弦波电压整流为直流电压，经电容储能稳压，再由逆变环节（一般是 **IGBT**）将直流电压变换成频率和幅值可调的电压，以驱动电机。

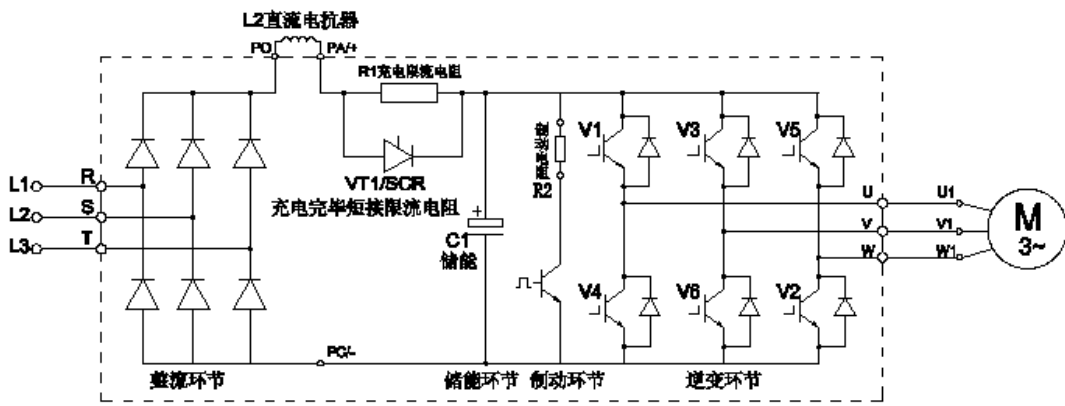


图 2-1 变频器主电路典型结构

思考题 7：变频器整流环节不采用二极管，而采用晶闸管，其主电路会有什么不同？

变频器整流环节由于采用了二极管（或晶闸管）整流，三相正弦波电流流过二极管、晶闸管这样的非线性器件，就会产生谐波电流。对于三相全桥整流电路（见图 2-1），每相在一个周期内有 **1/3** 的时间（正反各 **1/6**）是不流过电流的。因此，即使后面的负载是纯电阻，交流侧电流仍然含有大量的谐波电流，用傅立叶级数展开，谐波电流的次数为 **6n ± 1**

次。即 5 次，7 次，11 次，13 次……加之储能稳压电容 C1 的稳压作用，仅当相应交流线电压超过电容两端当前电压，电路中才有电流流过。这样该储能稳压电容使得电流流通的时间变短，从而加大了电流的不连续性，导致谐波电流增大。电容容量越大，直流电压越稳定，电流流通的时间越短，尖峰电流越显著，谐波电流也就越大；相反，电容容量越小，电流流通时间越长，谐波电流就越小，但直流电压的波动越大，稳压效果越差。

变频器三相桥式全波整流及电容充电电压波形参见图 2-2。

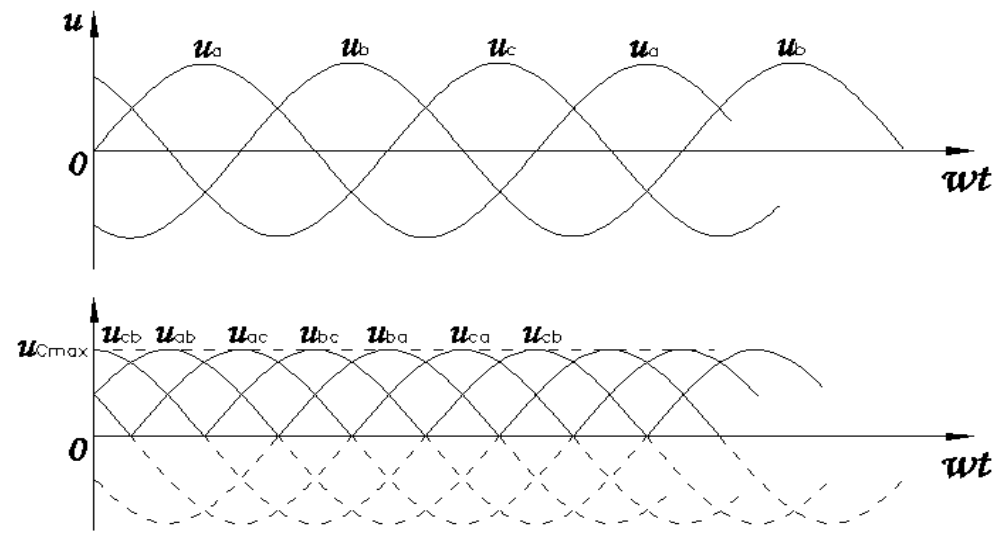


图 2-2 变频器三相桥式全波整流电压波形

图 2-2 中 u_{cmax} （虚线）为电容两端最大电压，也是输入线电压的峰值电压。显然，只有电容两端当前电压低于此时的输入线电压，电容才会被充电，进线侧才会有电流流过。

若选用小容量电容，输入电流的持续时间就增加，电流脉动就会减小，谐波电流会相应减小。但因小容量电容的稳压效果较差，直流母线电压的波动会比较大，从而导致变频器驱动电机输出的电磁转矩波动较大，而且电容容量减小意味着直流母线的储能减少。因此，这种方式只能用于负载变化不大、速度精度要求不高的场合，比如建筑领域中的离心风机、离心水泵这些简单机械。**施耐德电气的变频器 ATV21 采用了这种技术，将谐波电流总畸变率 THDI 降至 35% 以下（注意：此值仅仅是变频器这一个回路的谐波电流畸变率，不是电网谐波电流总畸变率），而不需要另外的谐波电流抑制选件。所以 ATV21 适用于建筑领域中的离心风机、离心泵这些要求不高的简单机械。**

以上我们讨论了变频器输入侧一定会向电网注入谐波电流，那谐波电流有危害吗？这些危害大吗？如果没有危害，那根本就没有必要治理谐波电流；或如果即便有危害，但危害很小，不足以对生产和生活造成影响，也没有必要治理谐波电流。

所以在探讨对谐波电流的治理前，我们应对谐波电流产生的危害有清楚的认识。在长期的工业生产和生活实践中，人们发现谐波电流的危害主要有以下几个方面：

- (1) 引起串联谐振及并联谐振，放大谐波电压和谐波电流，造成危险的过电压或过电流；
- (2) 3次谐波电流会汇集到零线，使中性点偏移，容易引起火灾；
- (3) 产生谐波损耗，使发、变电和用电设备发热严重，致使效率降低；
- (4) 加速电气设备绝缘老化，从而缩短设备的使用寿命；
- (5) 使设备（如电机、继电保护、自动装置、测量仪表、电力电子器件、计算机系统、精密仪器等）运转不正常或不能正常工作；
- (6) 干扰通讯系统，降低信号的传输质量，破坏信号的正确传递，甚至损坏通信设备。

由此可见，谐波电流会对日常生产和生活产生严重影响，因此，非常有必要对变频器产生的谐波电流进行治理。

那么，减小变频器产生的谐波电流可以采用哪些选件呢？**一般说来，减小变频器产生谐波电流的选件有：**

- (1) 直流电抗器、进线电抗器（又称线路电抗器或交流电抗器）；**
- (2) 无源滤波器。**

下面分别予以说明：

(一) 直流电抗器、进线电抗器

因为变频器整流环节及储能电容使得输入侧电流波形不连续，所以变频器进线侧电流的谐波含量较高（THDI一般超过80%，大功率变频器高达130%，甚至更高。注意这里的80%、130%仅仅是变频器这一个回路的谐波电流总畸变率）。在电路中串入电抗器以后，**由于流经电感的电流不能突变，交流侧的电流波形就会变得比较平滑。电抗器匝数越多，电感量越大，抑制电流突变的效果就越好，电流波形就越平滑。**

根据三相桥式整流桥的工作原理，电流通路是从交流侧流经上半桥的二极管（或晶闸管），再流经直流母线和储能电容。因此，电抗器串联在交流侧，和串联在直流侧，都能

起到抑制电流突变的效果。相比较而言，使用直流电抗器的效果更好一些，原因正如前文分析的那样：交流侧实际上有 1/3 时间并未流过电流。但交流电抗器还有保护整流桥等其它作用。

如果二者的电抗率相等，其 THDI 值相差不到 2%，在这种情况下，可以认为二者有相同的谐波抑制能力。

根据上述分析，电抗器的电抗值越大，其抑制谐波的能力越强。但其电抗值越大，压降也越大。过大的压降必然会减小变频器的输出电压，从而减小电机输出的电磁转矩。所以电抗器的电抗率一般为 3~5%，此时变频器 THDI 值一般大于 35%，而小于 48%，很接近 IEC 标准中 $\text{THDI} \leq 48\%$ 的要求。进线电抗器实物见图 2-3。

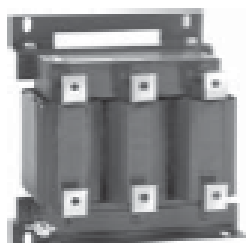


图 2-3 进线电抗器

根据上述分析，电抗器是利用电流流经电感线圈不能突变的原理制成，其效果不但比较差，而且谐波电流最终还是要流入电网。**那有没有办法让谐波电流不流入或少流入电网呢？**

在解答这个问题之前，我们回顾一下电路中最基本的三种器件：电阻、电抗和电容。

我们知道：

- (1) 电阻是线性器件，对电压和电流变化不会有任何表现；
- (2) 电抗器会阻碍电流的变化，其感抗值为 ωL ，电流频率越高，感抗值越大，阻碍电流变化的效果就更好。**需要注意的是，此时谐波电流的通路仍然是变频器——电网。**

分析到这里，我们很容易想到一种非常重要的器件：“电容”，其容抗值为 $1/\omega C$ 。电流频率越高，其容抗值越小。电流有个特点，哪里的“阻碍”小，就往哪里流。谐波电流的频率都很高，所以谐波电流很容易通过电容。

所以，采用电容来“吸收”谐波电流（注意这里的用词，不是“抑制”，而是“吸收”），可以取得非常好的效果。这样，我们从原理上，也就是从根本上，找到了减少变频器向电网注入谐波电流的有效途径。

利用电容和电抗器的合理组合，就可以得到变频器进线侧一种非常重要的谐波电流抑制元件：无源滤波器。下面我们对无源滤波器做详细说明。

(二) 无源滤波器

无源滤波器由电抗器和电容器这些无源元件组成，用来减小注入电网的谐波电流。其基本原理是，利用电抗器感抗和电容器的容抗与频率有关的特性，合理设计电抗器、电容器的电路结构和参数，使滤波器对于某特定频率的谐波电流呈低阻抗，该特定频率的谐波电流（如对于 6 脉冲的变频器为 5 次和 7 次谐波电流）将大量地流入滤波器（注意这里的用词，是“流入”），从而大大减少了流入电网的该特定频率的谐波电流，以起到滤除谐波电流的作用。无源滤波器吸收谐波电流的原理见图 2-4。

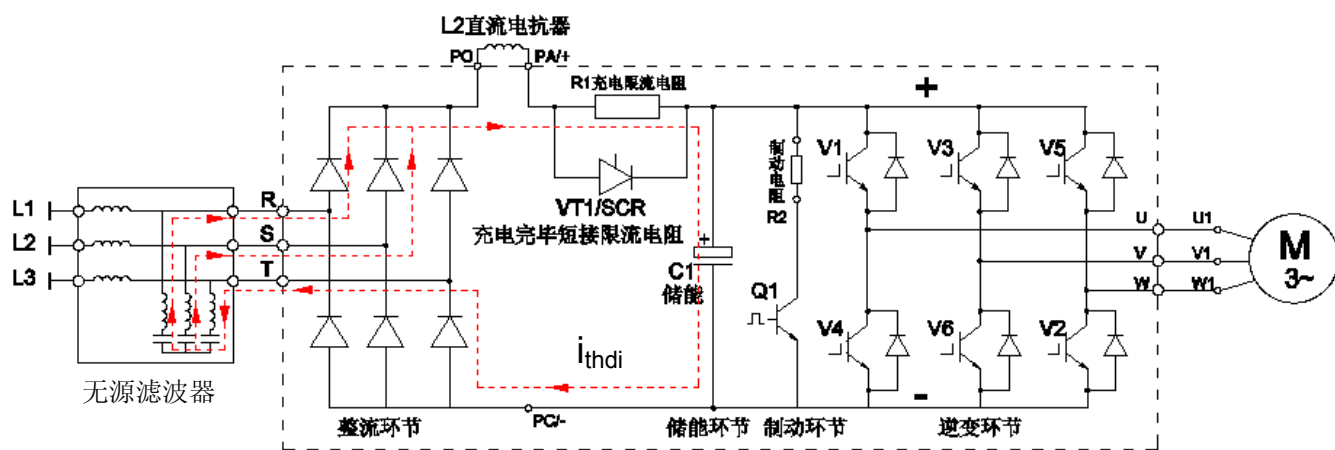


图 2-4 无源滤波器吸收谐波电流

采用了无源滤波器后，特定次数的谐波电流会在：无源滤波器的电容——变频器整流桥——（变频器内部直流电抗器）——变频器直流母线——变频器内部储能电容之间形成通路，而不再流入电网。

对于一台既定的变频器，其产生的谐波电流次数和大小相对固定，所以这种滤波器的设计并不困难，效果也比较好的，一般能达到 THDI<10%。图 2-5 比较了采用电抗器和无源滤波器的输入电流波形，很明显，使用无源滤波器后的电流波形已经非常接近正弦波了。

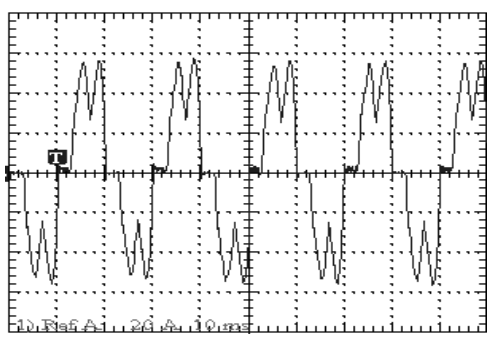


图 2-5a 采用电抗器输入电流波形

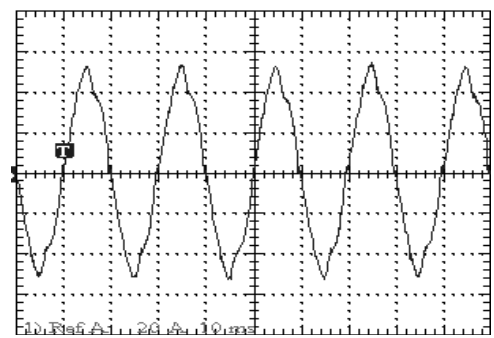


图 2-5b 采用无源滤波器输入电流波形

无源滤波器和直流电抗器如果同时使用，可以取得更好的谐波抑制效果。比如，施耐德电气提供与 **ATV61/71** 相匹配的两种无源滤波器，单独使用分别能将 **THDI** 降至 **16%** 及 **10%**，如果配合直流电抗器一起使用，则可以分别将 **THDI** 降至 **10%** 和 **5%**。

无源滤波器使用了大量的大电流电感、电力电容和电阻等器件，所以价格要比电抗器高出许多。

下面，我们对变频器 **ATV21**、**ATV61** 和 **ATV71** 进线侧选件的功能和选择做个总结。

一、 变频器 **ATV21** 进线侧**不需要**选件抑制谐波电流

根据前面的论述，变频器 **ATV21** 进线侧不需要任何选件来抑制谐波电流，而采用专利技术将 **THDI** 值降到 **35%** 以下，满足 **IEC** 标准中 **THDI $\leq$ 48%** 的要求。

二、 变频器 **ATV61/71** 进线侧**需要**选件抑制谐波电流

变频器 **ATV61/71** 输入侧需要选件来抑制谐波，这些选件有：进线电抗器（也称交流电抗器或线路电抗器）、直流电抗器和无源滤波器。现总结如下：

进线电抗器（电抗率 **3%~5%**）的作用有：

1. 抑制变频器产生的谐波电流（能力较弱，一般情况下满足 **35%<THDI<46%**）；
2. 提高变频器输入侧功率因数（一般可提高至 **0.85**）；
3. 减小传导性干扰；
4. 减小电网电压波动对变频器的影响；
5. 减小三相电压不平衡对变频器的影响。

直流电抗器（电抗率 **3%~5%**）的作用有：

1. 抑制变频器产生的谐波电流（能力较弱，一般情况下满足 **35%<THDI<46%**）；
2. 提高变频器输入侧功率因数（一般可提高至 **0.9**）；

无源滤波器的作用：

1. 吸收谐波电流的能力很强，但价格较高；
2. 和直流电抗器同时使用可以取得更好的效果。

具体应用中，这三种选件的选配方法见表 **2-1**。

需要提醒注意的是：在实际应用中，变频器 **ATV61/71** 电源侧一定要有减小谐波电流的选件，要么是进线电抗器，要么是无源滤波器。也就是，进线电抗器比直流电抗器有优先权：可以单独使用进线电抗器而不是直流电抗器。

为了帮助读者加深对直流电抗器、交流电抗器和无源滤波的理解，这里留一道思考题：

思考题 8：电抗器（指直流电抗器和交流电抗器）和无源滤波相比，减小谐波电流的能力为什么较差？

序号	谐波抑制选件	适用变频器功率范围	备 注
1	无源滤波器+直流电抗器	ATV61H075N4~HC63N4 ATV71H075N4~HC63N4	1. 无源滤波器有两个系列，分别可将 THDI 抑制到小于 16%或 10%，如果配合直流电抗器，可将谐波抑制到 10%或 5%。 2. ATV61H075N4~HD75N4（0.75~75KW）之间的变频器需另加直流电抗器，参见《ATV61 产品目录》第 149 页。 3. ATV71H075N4~HD75N4（0.75~75KW）之间的变频器需另加直流电抗器，参见《ATV71 产品目录》第 155 页。 4. N4 系列供电电压为 3 相 AC380~480V@50/60Hz。
2	进线电抗器+直流电抗器	ATV61H075N4~HD75N4 ATV71H075N4~HC63N4	1. ATV61H075N4~HD75N4（0.75~75KW）之间的变频器需另加直流电抗器，参见《ATV61 产品目录》第 149 页。 2. ATV71H075N4~HD75N4（0.75~75KW）之间的变频器需另加直流电抗器，参见《ATV71 产品目录》第 155 页。 3. N4 系列供电电压为 3 相 AC380~480V@50/60Hz。
3	进线电抗器	ATV61H90N4D~HC63N4D	1. ATV61***N4 系列变频器，90KW 及以上采用了进线电抗器，必须取消直流电抗器，在型号末尾加 D 订购不带直流电抗器的变频器。 2. N4 系列供电电压为 3 相 AC380~480V@50/60Hz。
4	进线电抗器	ATV61HU30Y~HC80Y ATV71HU22Y~HC63Y	Y 系列必须采用进线电抗器， 供电电压为 3 相 AC500~690V@50/60Hz

表 2-1 变频器 ATV61/71 谐波抑制方案——输入侧选件选型表

2.1.3 变频器出线侧 dv/dt 抑制选件

变频器输出侧选件用来抑制变频器输出产生的过电压，其作用非常重要，但往往被忽略。这一节我们详细讨论变频器输出产生过电压的根本原因和危害，并给出解决方法。

我们知道，变频器输出电压是一系列矩形脉冲。我们查看变频器产品样本时，会看到“开关频率”这个参数。变频器一组逆变管（一般是 IGBT）的一次“通”和“断”（“开”和“关”），对应一个输出电压脉冲。“开关频率”就是一个周期内变频器一组逆变管的通断次数。显然，开关频率越高，一个周期内电压脉冲序列就越多，电流波形越接近正弦波，但逆变管发热也越严重，辐射干扰也越大。如果设置过低，电流波形失真度增加，平滑性变差，电机振动和噪声会增加，但逆变管发热会减小。

很明显，开关频率的高低决定了 dv/dt 的大小（即输出电压对时间的变化率）。开关频率越高，一个周期内的电压脉冲就越密集，脉冲的前后沿就越陡， dv/dt 也就越大。

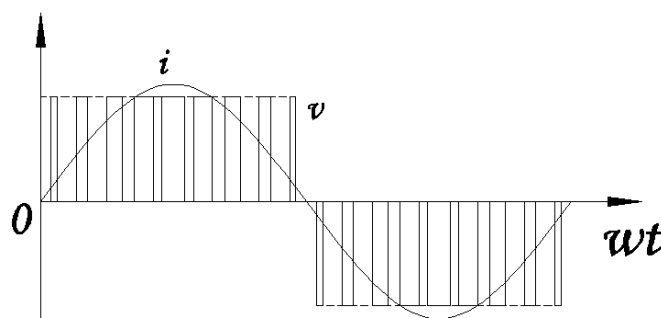


图 2-6 变频器输出电压脉冲序列及回路中电流波形

图 2-7a 是示波器实测的变频器输出侧三相电压波形，图 2-7b 是示波器实测的电机侧单相电压波形，图 2-7c 是示波器实测的变频器侧三相回路电流波形，2-7d 是示波器实测的电机侧三相回路电流波形。

在该案例中，电机电缆（变频器与电机之间的动力电缆）约 90 米。从图 2-7a 可以看出，变频器输出侧的三相电压波形相对规整，电压幅值在 400V 以下，几乎没有尖峰脉冲，但经过 90 米的动力电缆，到了电机侧，电压波形就变得杂乱无章了，并且产生了很多尖峰电压，这些尖峰电压就是过电压。此案例中，电机绝缘被过电压击穿，导致电机损坏。

需要注意的是，变频器不可能检测到这种过电压，也不可能对这种过电压提供保护。原因由读者自行思考。

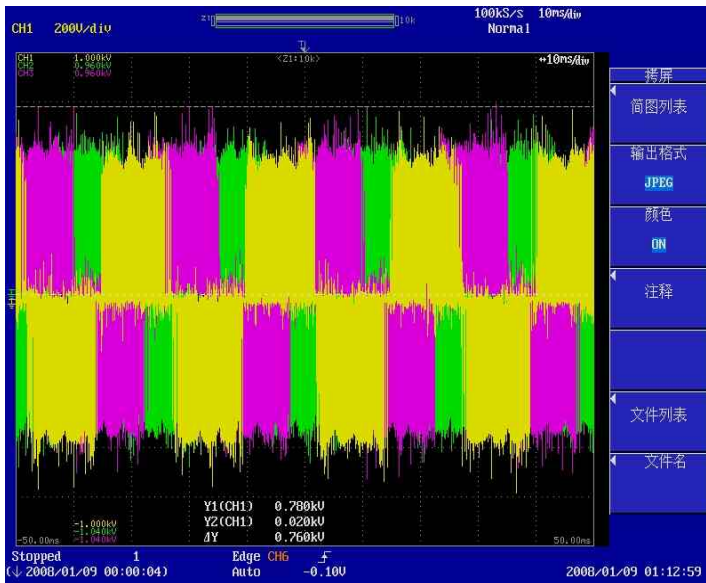


图 2-7a 变频器侧电压波形

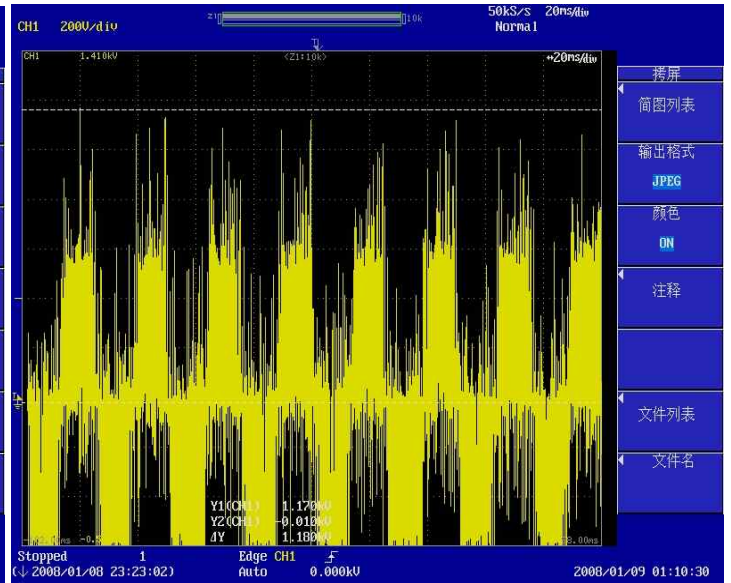


图 2-7b 电机侧电压波形

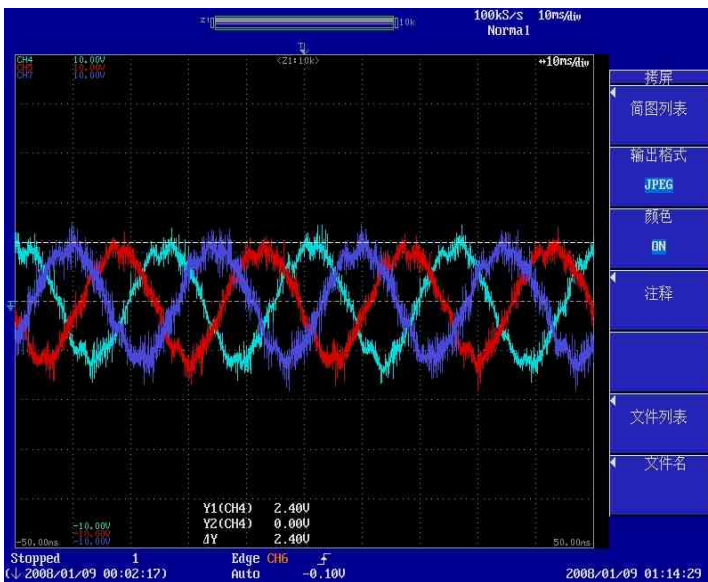


图 2-7c 变频器侧电流波形

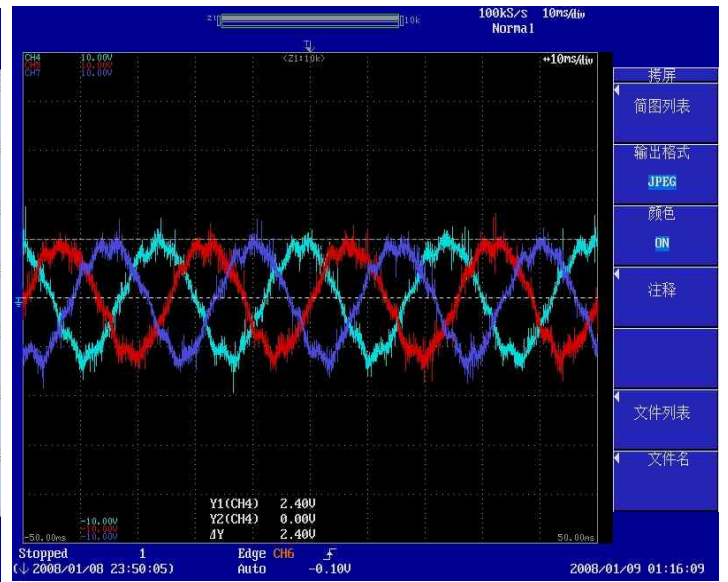


图 2-7d 电机侧电流波形

为什么变频器输出电压是矩形脉冲就会产生过电压呢？

这是因为，变频器输出电压为矩形脉冲，前后沿对时间的变化率 dv/dt 非常大，变频器与电机之间的电缆有电抗值 Z ，该电缆还存在分布电容 C 。而 $Z \times C \times dv/dt$ 的量纲就是电压，即过电压 $U = Z \times C \times dv/dt$ （式 2-1），该电压以传导方式加在电机端。如果该过电压大到一定值，就会损害电机的绝缘（如果仅仅是数学运算，过电压 $U = Z \times C \times dv/dt$ 可由物理学公式 $Q = CU$ 很容易地推导出来，设 Q 为 U 为的函数，等式两边对时间求导，为

$dQ/dt=CdU/dt$ 。 dQ/dt 为电量对时间的变化率，即为电流 i 。等式两边再乘电抗 Z ，为：

$ZdQ/dt=ZCdU/dt$ ），即： $Z \times i=Z \times C \times dU/dt$ ，

于是可得到式 2-1： $U=Z \times C \times dv/dt$ ）。

由此可见，变频器输出产生过电压的根本原因在于：变频器输出电压波形不再是正弦波，而是矩形脉冲，该矩形脉冲前后沿对时间的变化率 dv/dt 非常大。

如果输出电压波形为正弦波，其对时间的变化率为余弦，形式不变。所以对于软起动器等输出电压为正弦波（或不完整的正弦波）的起动器而言，没有“输出过电压”一说。

根据式 2-1，变频器输出过电压 $U=Z \times C \times dv/dt$ 。很明显，过电压值与电缆电抗值 Z 成正比，与电缆分布电容 C 成正比，与电压变化率 dv/dt 成正比。减小电抗值 Z ，或（和）减小电缆分布电容 C ，或（和）减小 dv/dt ，都可以减小输出过电压，亦即减小变频器输出过电压的途径有 3 个：

- （1）减小电机电缆（即变频器与电机之间的动力电缆）的电抗值 Z ；
- （2）减小电机电缆的分布电容 C ；
- （3）减小 dv/dt 。

下面我们对这三种途径做详细论述，以确定减小变频器输出过电压的有效、实用途径。

（1）通过减小电机电缆的电抗值以减小变频器输出过电压

根据式 2-1，变频器输出过电压 $U=Z \times C \times dv/dt$ ，所以减小电机电缆的电抗值 Z ，可以减小变频器输出过电压。

减小电缆电抗值 Z （主要减小阻抗 R ）的方法有三个：I 选用电阻率更小的电机电缆；II 减小电机电缆长度；III 增大电机电缆的截面。

I 选用电阻率更小的电机电缆以减小变频器输出过电压

目前工程上选用的电缆材质一般为铜和铝，铜的电阻率 $1.7 \times 10^{-8}(\Omega \cdot m)$ ，铝的电阻率为 $2.9 \times 10^{-8}(\Omega \cdot m)$ ，二者相差很小。并且实际工程中，电机电缆一般都选用铜质电缆。所以，通过选用导电性能更好的电缆以减小电抗 Z ，不具有实际意义。

II 减小电机电缆的长度以减小变频器输出过电压

电缆电抗值 Z 与电缆的长度 L 成正比，减小电缆长度 L 也可减小电缆的电抗值 Z ，从而减小过电压。在工程实际中，变频器柜一般统一安放在一个动力房间，电机一般与设

备安装在一起。只在个别案例中，或许可将变频器柜安放到与电机尽可能近的地方。所以，通过减小电机电缆的长度以减小电抗值 Z 不具有普遍意义。

III 增大电机电缆的截面以减小变频器输出过电压

增大电缆截面积，也可以减小电抗值 Z ，如将 16mm^2 动力电缆换成 25mm^2 动力电缆，这样电阻虽减小了 $9/25$ ，但会增大电缆的分布电容（见下一节），所以效果并不显著，而且增加了施工难度，因此实际意义不大。

结论：通过减小电机电缆的电抗值 Z 以减小变频器输出过电压的各种途径不具有实际意义，一般不采用。

（2）通过减小电机电缆的分布电容 C 以减小变频器输出过电压

根据式 2-1，变频器输出过电压 $U=Z \times C \times dv/dt$ ，所以减小电机电缆的分布电容 C ，也可以减小变频器输出产生的过电压。

在探讨减小电机电缆分布电容的方法前，我们先探讨电机电缆的分布电容 C 与那些因数有关。

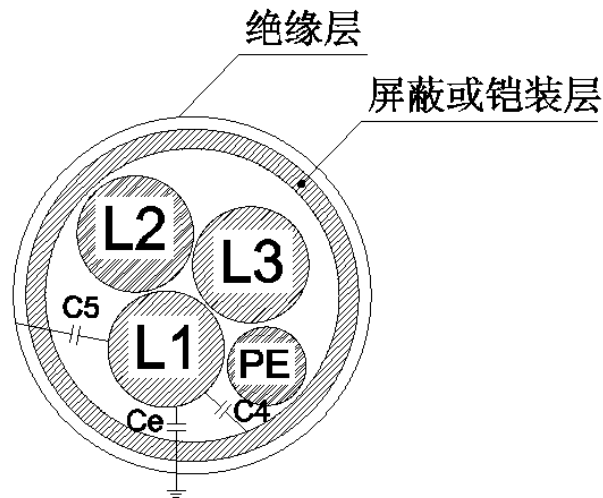


图 2-8 3 相线+1PE 电机电缆电容分布图

如图 2-8 所示，以 $L1$ 相为例，分布电容有：对相线 $L2$ 的电容 C_{1-2} ，对 $L3$ 的电容 C_{1-3} ，对绝缘层的电容 C_1 ，对屏蔽层（或铠装层）的电容 C_4 ，对绝缘外层的电容 C_5 ，对大地的电容 C_e 。这些电容均并联分布。所以 $L1$ 相总的分布电容

$$C_{L1} = C_{1-2} + C_{1-3} + C_1 + C_4 + C_5 + C_e \quad (\text{式 2-2})。$$

同理， $L2$ 相总的分布电容

$$C_{L2} = C_{2-1} + C_{2-3} + C_2 + C_4 + C_5 + C_e \quad (\text{式 2-3})，$$

L3 相总的分布电容

$$C_{L3} = C_{3-1} + C_{3-2} + C_3 + C_4 + C_5 + C_e \text{ (式 2-4) }。$$

因三相线线径相同，对称分布，显然， $C_{1-2} = C_{1-3} = C_{2-1} = C_{2-3} = C_{3-1} = C_{3-2}$ ， $C_1 = C_2 = C_3$ ，所以 $C_{L1} = C_{L2} = C_{L3}$ 。

根据电容的计算公式 $C = \epsilon S / 4 \pi k d$ （式中， ϵ 为介电常数，由两极板之间介质决定（注：空气的 $\epsilon = 1 \sim 1.2$ ，聚氯乙烯的 $\epsilon = 3.4$ ，橡胶的 $\epsilon = 3$ ）； S 为极板正对面积； k 为静电力常量），很容易得知，**以上各电容的大小均与电缆的长度成正比。**

如果动力电缆为非屏蔽电缆，则相线对屏蔽层（或铠装层）的电容 $C_4=0$ ，式 2-2 为： $C_{L1} = C_{1-2} + C_{1-3} + C_1 + C_5 + C_e$ 。**所以非屏蔽电缆的电容值比屏蔽电缆的电容值小。**

综上所述，电机电缆的分布电容 C 与以下因数有关：

I 电机电缆的长度

电缆越长，分布电容 C 越大，从而产生的过电压越大；电缆越短，分布电容 C 越小，从而产生的过电压越小。

II 电机电缆的截面积

电缆截面积越大，分布电容 C 越大，从而产生的过电压越大；电缆截面积越小，分布电容 C 越小，产生的过电压越小。但电缆截面积减小后，阻抗值 Z 会增大，这会增大过电压。

III 电机电缆的类型：屏蔽（铠装）或普通电缆

如果采用屏蔽电缆，根据式 2-2，很容易得到：

$$C_{L1pb} = C_{1-2} + C_{1-3} + C_1 + C_{4pb} + C_5 + C_e \text{ (式 2-5) }。$$

如果采用铠装电缆，根据式 4-2，很容易得到：

$$C_{L1kz} = C_{1-2} + C_{1-3} + C_1 + C_{4kz} + C_5 + C_e \text{ (式 2-6) }。$$

如果采用普通电缆，则 $C_4=0$ ，则为：

$$C_{L1pt} = C_{1-2} + C_{1-3} + C_1 + C_5 + C_e \text{ (式 2-6) }。$$

由于电缆相线对屏蔽层的电容小于对铠装层电容，即： $C_{4pb} < C_{4kz}$ ，所以

$$C_{L1pt} < C_{L1pb} < C_{L1kz} \text{ (式 2-7) }。$$

下面，我们探讨通过减小电机电缆分布电容以减小变频器输出过电压的可行途径。

在工程实际中，变频器柜一般统一安放在一个动力房间，电机一般与设备安装在一起。在个别案例中，或许可将变频器柜安放到与电机尽可能近的地方。所以，通过减小电机电缆的长度以减小分布电容 C 不具有普遍意义。

动力电缆的截面积依据电机额定电流、环境温度等条件来选择，通过减小电缆截面积以减小电缆的分布电容，一般来说是行不通的。

根据前面的分析，我们知道，对于同样截面、同样长度的动力电缆，普通电缆的分布电容 $C_{L1pt} < \text{屏蔽电缆的分布电容 } C_{L1pb} < \text{铠装电缆的分布电容 } C_{L1kz}$ ，所以同等情况下，采用普通电缆变频器产生的过电压 U_{pt} ，与采用屏蔽电缆变频器产生的过电压 U_{pb} ，以及采用铠装电缆变频器产生的过电压 U_{kz} ，这三者之间的关系为： $U_{pt} < U_{pb} < U_{kz}$ 。

通过上述分析，我们可以得知：相同截面、相同长度的电机电缆，在相同运行条件下（注意这里的相同运行条件：指相同的变频器，且其开关频率和运行频率相等），铠装电缆产生的过电压最大，其次是屏蔽电缆，普通电缆产生的过电压最小。或者说，铠装电缆允许的供电距离最短，一般不超过 30 米；其次是屏蔽电缆，一般不超过 50 米；供电距离最长的是普通电缆，但一般不超过 70 米（这些数值仅适用于三相 AC400V@50Hz 供电的场合）。

既然选用普通电缆可以有效地减小变频器输出产生的过电压，或者说，采用普通电缆，电机电缆的长度可以被延长，那电机电缆是否可以无一例外地全部选用普通电缆呢？答案是否定的。为什么呢？因为变频器输出电压是矩形脉冲，会向周围空间辐射大量的电磁能量，这势必会影响周围设备的正常运行，致使周边的流量计、各种传感器等元件根本无法正常工作。所以当电机电缆附近有重要的敏感设备或检测元件时，通常会考虑采用屏蔽电缆，甚至铠装电缆。

采用屏蔽电缆或铠装电缆后，电机电缆向周围空间辐射的能量减小了，但减小的这部分能量去哪里了呢？消失了吗？如果没有消失，那转换成了什么了呢？我们设计的时候又应该注意些什么呢？

这几个问题留作思考题（思考题 9），供读者思考回答。

总结起来，减小电机电缆分布电容的可行方法是：

采用普通动力电缆，如果普通动力电缆周围有敏感设备和检测元件，可考虑将该电缆单独穿钢管。

根据过电压公式： $U=Z\times C\times dv/dt$ ，通过前两节的讨论，我们知道：

- (1) 通过减小电机电缆的电抗值 Z 以减小变频器输出过电压的各种方法都不具有可行性；
- (2) 通过减小电机电缆分布电容 C 以减小变频器输出过电压的唯一可行方法是采用普通电缆，而且还有附加条件：允许采用普通电缆：即动力电缆周围没有敏感设备和检测元件，或者虽有敏感设备和元件，但现场条件允许电机电缆单独穿钢管。如果不满足这些条件，那就必须采用屏蔽电缆，甚至铠装电缆。
- (3) 即便采用了(2)中唯一可行的方法，采用了普通动力电缆，电机电缆最长不建议超过 70 米，一般 50 米会比较保险（仅针对三相 AC400V@50Hz 供电的场合）。

实际工程中，变频器距离电机，短则几十米，长则上百米，甚至几百米。如果遇到这种情况，又该如何处理呢？

通过上述分析，我们很容易想到处理方法。这个方法就是：直接减小 dv/dt 的值。减小 dv/dt 是减小变频器输出过电压最根本、最直接、最有效的方式。所以变频器技术资料 and 工程术语都说“抑制 dv/dt ”，实际上指的就是“抑制变频器输出过电压”。

既然抑制 dv/dt 是抑制变频器输出过电压最有效的方式，那怎么抑制 dv/dt 呢？方法有三：

- (1) 采用软件功能抑制 dv/dt ；
- (2) 采用电机电抗器抑制 dv/dt ；
- (3) 采用正弦滤波器抑制 dv/dt 。

下面对这三种方法分别予以说明。

(1) 采用软件功能抑制 dv/dt

我们知道，变频器输出电压为矩形脉冲。脉冲前后沿越陡峭，则 dv/dt 越大；脉冲前后沿越平缓，则 dv/dt 越小。所谓软件功能，就是适当控制变频器逆变管（IGBT）的导通，使得矩形脉冲前后沿变平缓，从而减小 dv/dt 。这就是软件功能抑制 dv/dt 。

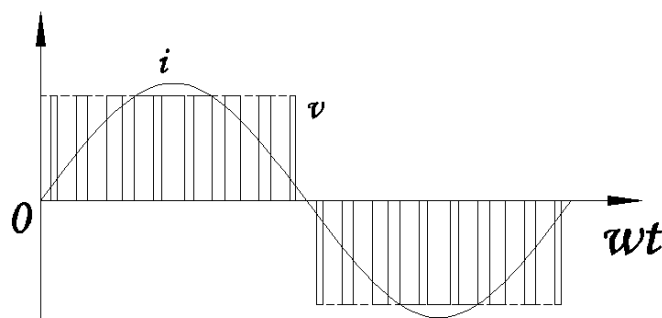


图 2-9 变频器输出电压脉冲序列及回路中电流波形

脉冲宽度越宽，通过软件减小 dv/dt 就越容易。但脉冲宽度越宽，意味着开关频率越低，开关频率过低会带来其它问题：如噪声过大，电流波形平滑度差，畸变严重。所以变频器的开关频率都有下限值。

通过以上分析，我们可以得到如下结论：

适当减小变频器的开关频率，可以一定程度上抑制变频器输出过电压，但能力非常有限。如果电机电缆（变频器与电机之间的动力电缆）采用普通电缆，建议最长不超过 70 米，但实际工程中一般不要超过 50 米；如果采用屏蔽电缆，则建议最长不超过 50 米，但实际工程中一般不要超过 30 米。小功率变频器允许的电机电缆长度更短。

（2）采用电机电抗器抑制 dv/dt

通过上一节的分析我们知道，通过软件功能抑制 dv/dt ，效果非常有限。一般情况下，当电机电缆超过 50 米时，采用软件功能抑制 dv/dt 就不适用了；如果是屏蔽电缆，则超过 30 米，采用软件功能抑制 dv/dt 就不适用了。

但变频器与电机之间的动力电缆往往会有好几十米，甚至上百米，那该采用什么方式来抑制 dv/dt 呢？答案是：采用电机电抗器。

这个选件不要与变频器进线侧的谐波电流抑制选件——进线电抗器搞混了。电机电抗器加在变频器出线端，与电机相连，所以称为电机电抗器，用来抑制 dv/dt 。而进线电抗器加在变频器进线侧，用来抑制变频器产生的谐波电流。二者之间不存在任何联系。

为了加深读者对进线电抗器和电机电抗器的印象，这里出一个思考题，思考题 10：电机电抗器与进线电抗器有什么联系？

一般说来，电机电缆若为非屏蔽，如果不超过 300 米，可以采用电机电抗器抑制 dv/dt ，对于小功率变频器，允许的电机电缆长度小于 300 米。

电机电抗器可以抑制 dv/dt ，其原理是怎样的呢？



图 2-10a 电机电抗器实物

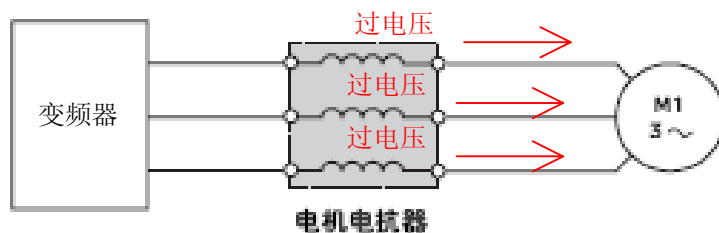


图 2-10b 采用电机电抗器抑制 dv/dt

电机电抗器是由导线绕在铁芯上制成的，用在交流回路中抑制电流的变化。其原理是，当流过线圈的电流发生变化时，线圈会产生自感电动势 u ，该自感电动势 u 与变频器输出电压的变化方向相反。

由于电机电抗器抑制 dv/dt 的原理是利用回路中电流发生变化时，电抗器中产生自感电动势 u 来抑制 dv/dt ，所以电机电抗器抑制 dv/dt 的能力较弱，电机电缆若为普通电缆，其长度一般不超过 300 米，小功率变频器允许的长度会更短。

具体选型时，可查看变频器样本。比如《ATV61 变频器产品目录》第 166~167 页，列出了各种规格的 ATV61 变频器所对应的电机电抗器型号。以 ATV61HU40N4 为例，可以选用三个型号的电机电抗器，分别为 VW3 A5 101、VW3 A5 102 和 VW3 A5 103。每个型号的电机电抗器对应了屏蔽电缆和非屏蔽电缆的最大长度。比如，如果采用 VW3 A5 101，电机电缆若为非屏蔽，则最长可到 90 米，如果是屏蔽电缆，则最长只能到 75 米。

（3）采用正弦滤波器抑制 dv/dt

在前两节，我们讨论了采用软件和电机电抗器来抑制 dv/dt ，其能力都非常有限：采用软件抑制 dv/dt ，电机电缆长度一般不超过 50 米，采用电机电抗器，电机电缆长度不超过 300 米。但在实际工程中，变频器与电机之间的动力电缆有可能长达四五百米，甚至达 1000 米。遇到这种情况又该怎么办呢？

答案是：采用正弦滤波器。

这个选件不要和变频器进线侧的谐波电流吸收选件——无源滤波器搞混了。无源滤波器加在变频器进线侧，用来“吸收”变频器产生的谐波电流（注意，这里用的是“吸收”一词，没有用“抑制”一词。希望读者能从用词上深刻体会到无源滤波器的原理和结构，从而理解为什么无源滤波器滤除谐波电流的效果非常好。详情可参考“2.1.2 变频器进线侧选件”）。正弦滤波器用在变频器出线侧，用来吸收变频器输出产生的过电压。二

者没有任何联系。为了便于记住正弦滤波器这个重要附件，可以简单地认为，用了正弦滤波器，变频器输出回路中的电流会是标准的正弦波，参考图 2-7c 和 d。

为了加深读者对二者的印象，这里出一个思考题（思考题 11）：

正弦滤波器和无源滤波器有什么联系？

正弦滤波器为什么可以将电机电缆延长到数百米，甚至 1000 米呢？聪明的读者可能马上意识到了：正弦滤波器与电机电抗器抑制 dv/dt 的原理不同。

事实正是这样，在上一节中，我们分析了电机电抗器抑制 dv/dt 是利用自感电势抵消 dv/dt 来实现的。那正弦滤波器抑制 dv/dt 的原理又是什么呢？

回到我们分析谐波电流抑制选件的内容，读者应该还记得我们的思路：电抗器抑制谐波电流的原理是利用了电流流经电感线圈不能突变的原理，虽然能抑制一部份谐波电流，但谐波电流与电网之间有通路，剩余的谐波电流仍然流向电网，在变频器——电网之间形成“谐波环流”。为了不让谐波电流流向电网，我们想到了电容，引入了无源滤波器，这样，特定次数的谐波电流就在无源滤波器和变频器之间形成环流，而不再流入电网，从而取得非常好的滤波效果。

按照同样的思路，我们很容易想到：如果不利用电抗器产生的自感电势来抵消一部份过电压，而利用电容两端电压不能突变的特性，不就可以从根本上吸收这部分过电压了吗？

和无源滤波器类似，正弦滤波器由 2 组功率电阻 R1、R2 和两组电容 C1、C2 组成。

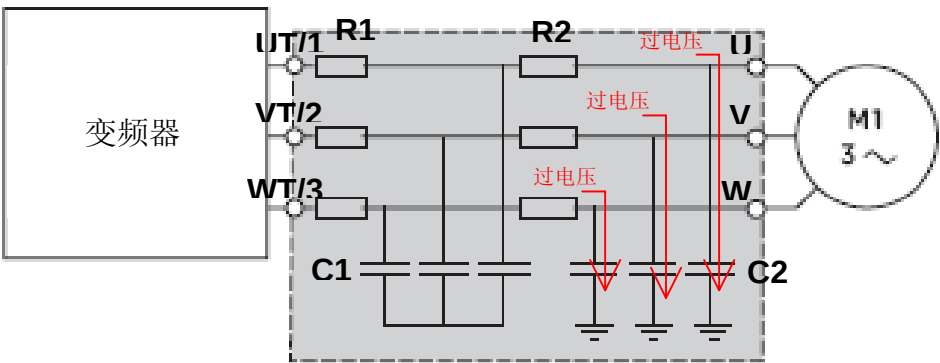


图 2-11 正弦滤波器吸收过电压

正弦滤波器是怎样抑制 dv/dt 的呢？

当变频器接收到运行命令，输出电压和频率根据预先设定的参数值逐渐增加，此过程中，电容组 C1 通过 R1 被逐渐充满电，电容组 C2 通过 R1 和 R2 也被充满电。这样，电容组 C1 起到稳压作用，而突变的电压通过电容组 C2 释放到大地。这实际上就是为

“快速变化的电压”另外开辟了一条通往大地的通路，而不再通过电机电缆叠加到电机端子。

注意这种思路，与采用无源滤波器吸收谐波电流有异曲同工之妙。

谐波电流一定有个通路，电抗器只不过在变频器与电网之间的这个通路上设置了“障碍”，但谐波电流仍然在电网和变频器之间形成了“环流”。电抗器这个“障碍”只不过将谐波电流变得比较平滑了而已。既然设置电抗器这个“障碍”，通过“堵”的方式取得的效果不理想，那就“疏导”，给谐波电流另外一条通路。无源滤波器就提供了这样一条“通路”。特定次数的谐波电流在无源滤波器和变频器之间形成了“谐波环流”，这样，这些谐波电流就不再流入到电网。如果“疏”，再结合“堵”，那就是锦上添花，效果会更好，所以无源滤波器+直流电抗器可以取得更好的效果，可将 THDI 减小到 10%或 5%以下。

说完了“谐波电流”，我们再说“过电压”。如果变频器和电机之间只有动力电缆，这个过电压就一定会通过动力电缆加到电机动力端子上，即便加了电机电抗器，也只不过在这个“通路”上设置了一个“障碍”，这个“障碍”只是减小了“快速变化的电压”。这个“快速变化的电压”经过电机电抗器后，只不过减小了一点，经过动力电缆的传导放大，又“奋起直追”地加到电机的动力端子上。所以电机电抗器抑制 dv/dt 的效果很有限，最长不超过 300 米，小功率变频器允许的电机电缆长度更短。

与治理谐波的思路类似，既然“堵”的效果不好，那就给过电压另外一条“通路”。正弦滤波器就提供了这样一条通路。过电压通过正弦滤波器的电容被释放到大地，这样加在电机端的过电压就非常小了。所以采用正弦滤波器可将电机电缆延长到数百米，甚至 1000 米。

既然正弦滤波器抑制 dv/dt 的效果这么好，那为什么电机电缆在 300 米以内，不推荐用正弦滤波器，而推荐用电机电抗器呢？这是因为正弦滤波器的价格非常高，一般和变频器价格差不多，甚至更高。为节省投资，如果电机电缆不超过 300 米，就不用正弦滤波器而用电机电抗器。当然，如果投资宽裕，可追求更好的效果，选用正弦滤波器是完全可以的。

选用正弦滤波器时一定要注意：

- (1) 电机电缆绝不能选用屏蔽或铠装电缆，只能选用非屏蔽电缆；
- (2) 变频器控制模式只能是电压/频率比；
- (3) 变频器输出频率不能大于 **100Hz**。

另外还要强调，电机电抗器和正弦滤波器选型时，一定要参考变频器产品样本。如施耐德变频器 **ATV61** 的电机电抗器选型在《ATV61 产品目录》第 166~167 页，正弦滤波器的选型在 168~169 页。变频器 **ATV71** 的电机电抗器选型在《ATV71 产品目录》第 172~173 页，正弦滤波器的选型在 174~175 页。

总结起来，变频器输出侧选件的功能是抑制 **dv/dt**，非常重要，设计中必须予以考虑：

- (1) 电机电抗器最长可以将电机电缆延长到 **300** 米，小功率变频器允许的电机电缆长度更短；
- (2) 正弦滤波器最长可以将电机电缆延长到 **1000** 米；
- (3) 正弦滤波器效果更好，但价格更高；
- (4) 选型时必须参考变频器样本。

为了帮助读者更好地理解正弦滤波器和无源滤波器的原理和功能，这里出两道思考题。

思考题 12：为什么正弦滤波器的第二组电容必须接地，而无源滤波器的电容却不能接地？

思考题 13：如果将正弦滤波器反接，即变频器端输出接到正弦滤波器的 **U-V-W** 端，而将电机电缆接到 **UT/1-VT/2-WT/3**，会造成什么后果（参见图 2-11）？

2.1.4 变频器 EMC 滤波器

变频器 EMC 滤波器的作用非常重要。EMC 是英文 **Electromagnetic compatibility** 的缩写，即电磁兼容的意思。

电气设备在电磁环境中具有良好的免受干扰的能力，且其本身不能产生对在此环境中工作的其它装置所不能接受的电磁干扰，这就是电磁兼容，即 **EMC**。

电磁兼容包含了两方面的内容，即：

(1) 电磁干扰 (EMI)

设备向环境发送的电磁干扰强度不能影响其它设备。

(2) 电磁敏感度 (EMS)

环境中的电磁干扰在一定强度内不影响自身正常工作。

根据电磁能量传出装置和传入装置的途径，又有传导干扰和辐射干扰两个方面。传导干扰是指干扰能量通过电缆以电流的形式传播，对于变频器而言，主要是进线侧谐波电流产生。辐射干扰是指干扰能量以电磁波的形式传播，对于变频器而言，主要由进线侧的谐波电流和输出侧的逆变电压脉冲所产生。

需要强调的是，这些干扰既有变频器对其它设备的干扰，也有其它设备对变频器的干扰。

对于变频器而言，减小电磁干扰的选件就是 EMC 滤波器（注意是两个方面的，既减小自身对其它设备的干扰，以免影响其它设备的正常工作；也减小其它设备对自身的干扰，确保自身能正常运行）。EMC 滤波器分 A 类、B 类和附加的 EMC 滤波器。这三种滤波器减小电磁干扰的能力依次增加。A 类滤波器适用于工业环境，B 类滤波器适用于民用环境，附加的 EMC 滤波器可满足更严格的要求。

施耐德变频器 ATV21/61/71 系列中的 N4 子系列（三相 AC380~480V@50/60Hz 供电）和 Y 子系列（三相 AC500~690V@50/60Hz 供电）标配了 A 类 EMC 滤波器。如果需要满足更严格的要求，可考虑加装附加的 EMC 滤波器。如果需要加装附加的 EMC 滤波器，参考产品目录选型即可。

需要注意的是，变频器采用了 EMC 滤波器后，会有高频电流通过 EMC 滤波器流向大地。故带有 EMC 滤波器的变频器进线侧空气开关不能选用漏电保护型开关，否则会导致非故障跳闸。变频器提供单相接地故障保护，详见《4.1 变频器招标技术规范书注意事项》。

2.1.5 变频器制动能量释放选件

为什么要关注变频器的制动能量释放选件呢？这是因为，变频器在对电机进行制动时，能量不再由变频器传递到电机，而是由电机传递到变频器；并且因变频器整流环节是由具有单向导电性的二极管或晶闸管构成，这部分能量不能反馈回电网。这样，这些能量势必会使变频器母线电压升高，如果反馈功率比较大，就需要制动选件将这部分能量释放掉，否则就会因变频器母线电压急剧升高而造成故障，甚至损坏变频器，严重时有可能将储能稳压电容击穿而致使变频器爆炸。电机各种运行状态下能量的传递方向参见图 2-12。

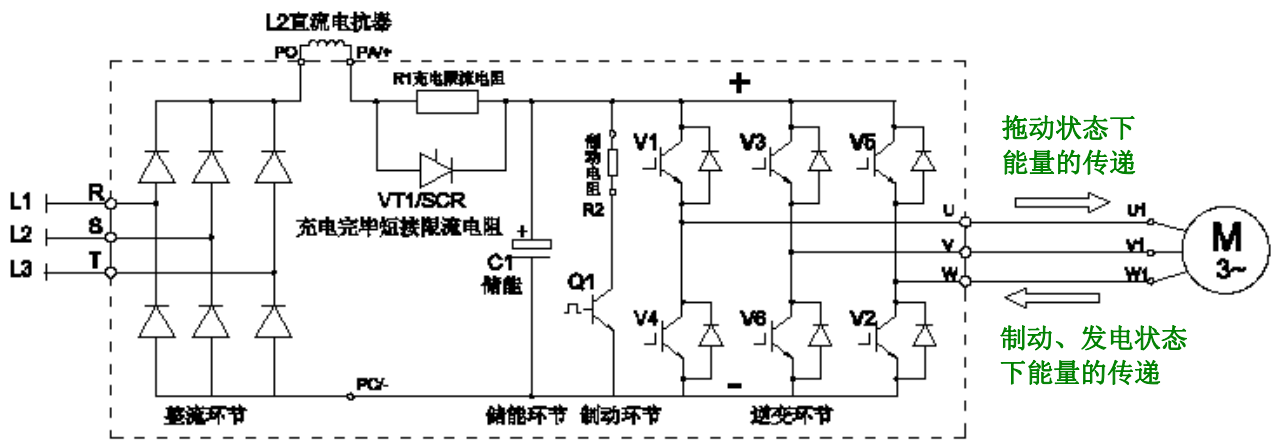


图 2-12 电机各种运行状态下能量传递方向

对于制动能量的释放，变频器提供两种了途径：（1）利用制动电路将其以热能形式释放，从而使得变频器母线电压保持在正常范围；（2）利用制动单元将这部分能量（直流）逆变成交流电，反馈回电网。

（1）利用制动电路释放能量

制动电路一般由制动晶体管（或制动单元）+制动电阻构成，接在变频器直流母线的“+极”和“-极”之间。正常情况下，制动晶体管（或制动单元）不导通，这样制动电路中没有电流流过。制动时，变频器控制晶体管（或制动单元）导通，制动电路中就有电流流过，这样电机反馈回的能量就通过制动电路中的制动电阻以热能的形式释放，使得直流母线电压维持在正常范围。

变频器制动原理图参见《图 2-12 电机各种运行状态下能量传递方向》。

以上我们深入分析了制动电路（制动晶体管（或制动单元）+制动电阻）的工作原理。如果变频器驱动离心泵，能量始终从变频器传递到电机，绝对不需要选配制动单元和制动电阻。这在我们编写“变频器招标技术规范书”时应特别注意。

如果变频器驱动风机，生产工艺要求风机的停机模式只要不是制动停机，也绝对不需要选配制动单元和制动电阻。即便是制动停机，如果制动要求不高，变频器也可不选配制动单元和制动电阻。比如施耐德的变频器 **ATV21**，就没有提供制动环节，但同样提供了制动停机功能，只不过该制动停机功能相对较弱而已。

根据以上分析，我们再次印证，软起动器的电路结构决定了，其自身绝对不可能有“制动单元和制动电阻”。我们在编写“软起动器招标技术规范书”时应特别注意。

对于施耐德的变频器 **ATV61H075N4~HC22N4**（0.75KW~220KW）之间的变频器，由于内置了动态制动晶体管，如果需要对负载进行制动，只需根据《ATV61 产品目录》选配相应的制动电阻即可。**ATV61HC25N4~HC63N4**（250KW~630KW）之间的变频器，由于没有制动晶体管，如果需要对负载进行制动，需根据《ATV61 产品目录》选配相应的制动单元和制动电阻。此时制动单元就相当于动态制动晶体管。

对于施耐德的变频器 **ATV71H075N4~HC16N4**（0.75KW~160KW）之间的变频器，由于内置了动态制动晶体管，如果需要对负载进行制动，只需根据《ATV71 产品目录》选配相应的制动电阻即可。**ATV71HC20N4~HC50N4**（200KW~500KW）之间的变频器，由于没有内置制动晶体管，如果需要对负载进行制动，需根据《ATV71 产品目录》选配相应的制动单元和制动电阻。此时制动单元就相当于动态制动晶体管。当 **ATV71** 用于起重时，应选配功率更大的起重电阻而不是制动电阻。

由于变频器制动时的，制动电阻（或起重电阻）消耗了大量的能量，故其通风散热必须得以保证，冷却散热空气必须经防尘净化处理。

施耐德的变频器 **ATV21** 不提供制动选件。

（2）利用能量回馈单元再生能量

上一节我们讨论了电机制动时，将电机反馈回的能量通过制动电路以热能的形式耗散，那有没有可能将这部分能量利用起来呢？

在解答这个问题之前，我们先来回顾一下变频器能量的变换过程：变频器将三相正弦波电压整流为直流，经电容储能稳压后，再逆变为交流。变频器在制动时，能量由电机反馈到变频器，其直流母线电压会升高。

我们完全可以参考变频器的逆变电路，将直流电逆变为交流电，反馈回电网，供其它设备使用。

图 2-13 是能量回馈单元与变频器电气连接示意图。能量回馈单元的输入端接到变频器直流母线的“PA/+”和“PC/-”。变频器制动时，其直流母线能量通过能量回馈单元逆变为交流电，反馈回电网，供其它用电设备使用。

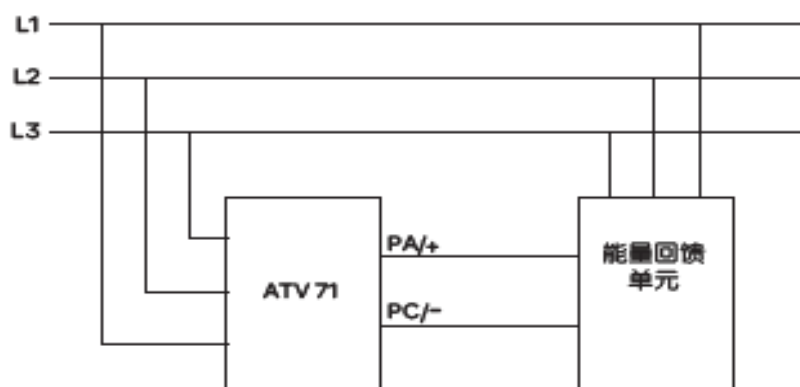


图 2-13 能量回馈单元

很显然，能量回馈单元对功率器件的要求非常高，控制必须非常精准，故其价格很高。但对于有大量起吊设备的场合，如冶金、码头等，起吊变频器如果选配了能量回馈单元，可取得显著的节能效果，从而大大减小运营成本。

2.1.6 变频器其它选件

在前 5 节中，我们详细讨论了变频器主回路接触器、进线侧选件、出线侧选件、EMC 滤波器、能量释放选件的作用、适用范围和选配方法。

变频器还有其它一些非常重要的选件：如对话工具、各种总线通讯卡、I/O 扩展卡、控制卡等。一般情况下，这些选件选错的可能性较小，我们就不再讨论。

2.2 软起动器选件功能说明

相对变频器而言，软起动器的选件要少得多。软起动器需要关注的选件有：进线接触器和旁路接触器（严格说来，这不是软起动器的选件）、快速熔断器、进线电抗器、通讯模块等。下面，我们对这些选件予以详细说明。

2.2.1 进线接触器和旁路接触器

严格意义上讲，进线接触器和旁路接触器不属于软起动器的选件。但这两个接触器的用法和意义非常重要，尤其是旁路接触器，如果不选配，会严重缩短软起动器的使用寿命，故在这里详细论述。

施耐德公司的软起动器 **ATS48** 在主回路可以选配两个接触器，一个是进线接触器，另一个是旁路接触器。这两个接触器的作用不同，现说明如下：

（1）进线接触器

进线接触器的作用是为了提高安全性和可靠性。

这个接触器受软起动器 **ATS48** 的故障触点控制。**ATS48** 检测到故障时，其故障继电器 **R1** 动作，使得进线接触器断开，在主回路形成一个明显的物理断点。以堵转故障为例，采用了 **ATS48**，超过 5 倍 **ATS48** 的额定电流，即判定为堵转。对于 **ATS48C48Q**，当回路中的电流 $I \geq 5 \times 480 = 2400\text{A}$ 时，**ATS48** 的故障触点立即动作，控制进线接触器断开，形成一个明显的物理断点。但此电流对于空气开关而言，是按 10 级脱扣的一个长延时，脱扣时间为 15s（5 倍额定电流）。

（1）旁路接触器

旁路接触器的主要作用是为了减小软起动器晶闸管的热耗散功率，以延长软起动器的使用寿命，同时还可防止浪涌电压对软起动器晶闸管的损害。

ATS48 旁路后，晶闸管中不再有电流流过，晶闸管的热耗散功率几乎为 0，但基于电流检测的很多保护（如过流、过载、缺相、欠载）都维持。**ATS48** 若采用旁路运行方式，其寿命一般可长达 20 年。如果不旁路，软起动器的使用寿命会受到严重影响。有钢铁企业曾使用 **ATS48** 没有采用旁路接触器，结果在一两年时间内，**ATS48** 大面积损坏。该企业认识到原设计的失误，更换了 **ATS48** 后全部采用了旁路运行模式，六七年过去了，至今没有一台 **ATS48** 损坏。

ATS48 旁路后，晶闸管的阴极和阳极成为等电位，雷击等浪涌电压不会对晶闸管造成损害。有这样一个案例：一台 400KW/3 相 380V 的空压机，选用了 ATS48 做驱动器。甲方最初没有用旁路接触器，一次雷击使得软起动器晶闸管被击穿而损坏，更换了晶闸管后，甲方抱着侥幸心理，依然不配旁路接触器，没过多久，晶闸管又因雷电击穿而损坏。如果一开始软起动器就配用了旁路接触器，这些损失完全可以避免。

施耐德的 ATS48 产品样本上有采用进线接触器而没有采用旁路接触器的电气原理图，这样的图纸只是对 ATS48 的触点功能做示意说明。

在实际应用中，建议将进线接触器和旁路接触器都加上。如果要非要取消一个接触器，可考虑取消进线接触器，而保留旁路接触器。

2.2.2 快速熔断器

快速熔断器对软起动器的晶闸管提供短路和堵转保护，以提高软起动器的安全性。注意这句话的含义：

- (1) 快速熔断器用来保护晶闸管，所以该快速软起动器在旁路接触器内侧，旁路运行中，工作电流不流过晶闸管，也就不流过快速熔断器；
- (2) 只有在软起、软停（或制动停机）过程中，电流才流过晶闸管，此时快熔才起到保护晶闸管的作用。运行过程中，如果发生堵转或短路等严重故障，故障电流并未流过晶闸管，如果有进线接触器，软起动器控制进线接触器断开；如果没有进线接触器，由软起动器和空气开关提供堵转和短路保护（此故障时，软起动器旁路接触器断开，晶闸管无触发脉冲不会导通，成为一个半导体断点）。
- (3) 为了能保护晶闸管，快速熔断器有两个电气参数非常重要：（1）快速熔断器的热效应值 i^2t 必须小于晶闸管的热效应值 i^2t ；（2）快速熔断器的额定电流一般为晶闸管额定电流（即软起动器额定电流）的 2~3 倍。

2.2.3 进线电抗器

软起动器因主回路采用了晶闸管，所以软起动器在软起、软停（或制动停机）过程中会产生谐波电流。但此波形是有缺口的正弦波，其产生的谐波电流很小，电流波形畸变很轻微。一般情况下软起动器可不加进线电抗器。但，当同一线路上有大量（超过 5 台）软起动器同时起停，应加装进线电抗器以抑制谐波电流。注意，此电抗器安装在旁路接触器内侧，旁路后正常工作电流不能流过该电抗器。

2.2.4 通讯模块

软起动器一般都内置了通讯协议，如施耐德公司的软起动器 **ATS48** 就内置了 **Modbus** 通讯协议。如果采用其它总线类型，可以选配相应的网关。如 **ATS48** 就提供了以太网 /**Modbus** 网桥、**FIPIO/Modbus** 网关、**Device Net/Modbus** 网关、**Profibus DP/Modbus** 网关。一般情况下，系统对软起动器的集成通过开关量就可以了。

2.3 变频器、软起动器主要选件总结

下面，我们将变频器、软起动器主要选件做个总结，以方便选型和应用。

2.3.1 变频器主要选件

（一）主回路接触器

施耐德的变频器 **ATV71/61/21** 主回路接触器的作用都相同：提高安全性和可靠性，在故障时受变频器故障触点断开，形成一个可靠的物理断点。变频器的起停控制严禁控制此接触器。

ATV61/21 主回路接触器建议加在出线侧。

ATV71 如果驱动罗茨风机、活塞泵、螺杆机等简单恒转矩机械，也建议将主回路接触器加在出线侧。

（二）进线侧谐波电流抑制选件：直流电抗器、进线电抗器和无源滤波器

变频器进线侧选件的首要功能是抑制变频器产生的谐波电流。如果变频器输入侧谐波电流总畸变率不满足 **IEC** 标准中 **THDI $\leq$ 48%** 的要求，则为错误的设计。

变频器 **ATV71/61** 进线侧一定要有选件，要么进线电抗器，要么无源滤波器。直流电抗器根据具体情况选配或取消，详见《2.1.2 变频器进线侧选件》。

变频器 **ATV21** 进线侧不需要谐波电流抑制选件。

（三）变频器出线侧 **dv/dt** 抑制选件：电机电抗器、正弦滤波器

变频器出线侧的选件用来抑制变频器输出的 **dv/dt**，其作用非常重要。对于变频器 **ATV61/71**：

- （1）电机电抗器最长可以将电机电缆延长到 **300** 米；
- （2）小功率变频器允许的电机电缆长度更短；
- （3）正弦滤波器最长可以将电机电缆延长到 **1000** 米；
- （4）正弦滤波器效果更好，但价格更高；

选型时必须参考变频器样本，并遵循相关要求，如选配了正弦滤波器，电机电缆绝不能选用屏蔽或铠装电缆。

变频器 **ATV21** 虽不提供过电压抑制选件，但当电机电缆超过 **50** 米，也应加电机电抗器。选型可参考变频器《**ATV61** 产品目录》或本书中 **ATV61** 一次图，按照功率相等的原则选择。

（四）EMC 滤波器

变频器 EMC 滤波器的作用非常重要。EMC 是英文 Electromagnetic compatibility 的缩写，即电磁兼容的意思。

电气装置在电磁环境中具有良好的免受干扰的能力，且其本身不能产生对在此环境中工作的其它装置所不能接受的电磁干扰，这就是电磁兼容，即 EMC。

施耐德的变频器 **ATV21/61/71** 系列中的 **N4** 子系列（三相 **AC380~480V@50/60Hz** 供电）和 **Y** 子系列（三相 **AC500~690V@50/60Hz** 供电）标配了 **A** 类 EMC 滤波器。如果需要满足更严格的要求，可考虑加装附加的 EMC 滤波器。

（五）制动能量释放选件

制动能量释放选件用于变频器制动时，释放电机向变频器传递的能量。

对于施耐德的变频器 **ATV61**，**ATV61H075N4~HC22N4**（**0.75KW~220KW**）之间的变频器，由于内置了动态制动晶体管，如果需要对负载进行制动，只需根据《**ATV61** 产品目录》，选配相应的制动电阻即可。**ATV61HC25N4~HC63N4**（**250KW~630KW**）之间的变频器，由于没有制动晶体管，如果需要对负载进行制动，需根据《**ATV61** 产品目录》，选配相应的制动单元和制动电阻。此时制动单元就相当于动态制动晶体管。

对于施耐德的变频器 **ATV71** 而言，**ATV71H075N4~HC16N4**（**0.75KW~160KW**）之间的变频器，由于内置了动态制动晶体管，如果需要对负载进行制动，只需根据《**ATV71** 产品目录》选配相应的制动电阻即可。**ATV71HC20N4~HC50N4**（**200KW~500KW**）之间的变频器，由于没有内置制动晶体管，如果需要对负载进行制动，需根据《**ATV71** 产品目录》，选配相应的制动单元和制动电阻。此时制动单元就相当于动态制动晶体管。当 **ATV71** 用于起重时，由于变频器会运行在电磁制动状态，起重电阻消耗了大量的能量，故其通风散热必须得以保证，冷却散热空气必须经防尘净化处理。

2.3.2 软起动器主要选件

（一）进线接触器和旁路接触器

施耐德电气软起动器 **ATS48** 进线接触器的作用是：提高安全性和可靠性，在故障时受软起动器故障触点控制而断开，形成一个可靠的物理断点。软起动器的起停控制严禁控制此接触器。旁路接触器的主要作用是为了减小软起动器晶闸管的热耗散功率，延长软起动器的使用寿命，同时还可防止浪涌电压对软起动器晶闸管的损害。

建议将进线接触器和旁路接触器都加上。如果要非要取消一个接触器，可考虑取消进线接触器，而保留旁路接触器。

（二）快速熔断器

快速熔断器可提高软起动器的安全性，以对软起动器的晶闸管提供短路和堵转保护。

（三）进线电抗器

一般情况下软起动器不用加进线电抗器。但，当同一线路上有大量（超过 5 台）软起动器同时起停，应加装进线电抗器以抑制谐波电流。注意，此电抗器安装在旁路接触器内侧，正常工作电流不能流过该电抗器。

3.施耐德电气变频器、软起动器一次图常见错误设计

本章分析了变频器、软起动器电路设计中常见的、典型的错误，有的错误会导致非常严重的后果，有可能导致变频器爆炸，造成严重财产损失和人身伤害。这一章节的内容以施耐德的变频器 **ATV21**、**ATV61**、**ATV71** 和软起动器 **ATS48** 为例，既有针对产品本身的错误或不合理设计的分析（仅适用于 **ATV21/ATV61/AT71/ATS48** 产品本身），也有一般性的错误或不合理设计（适用于所有变频器和软起动器），可以帮助初学人员掌握变频器、软起动器的正确设计，同时也可供广大工程设计、施工人员参考。

3.1 施耐德电气变频器一次图常见错误设计

3.1.1 施耐德电气变频器 ATV21 一次图常见错误设计

变频器 **ATV21** 是施耐德电气开发的针对建筑领域，负载为离心风机、离心泵，性价比非常高的一款变频器，主要用于建筑中的暖通空调（即舒适性空调）。

ATV21 一次图常见错误设计主要有两个：

1. 加热继电器做过载保护；
2. 将变频器旁路（严重错误）。

ATV21 一次图常见不合理设计主要有一个：

1. 接触器加在变频器进线侧。

下面针对这些错误和不合理设计分别予以详细说明。

(一)

错误的一次图

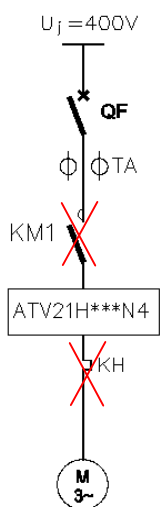


图 3-1

正确的一次图

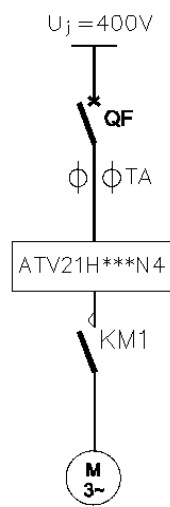


图 3-2

正确的一次图

一、图 3-1 中错误的设计：

1. 变频器输出加热继电器做电机热保护

变频器提供的保护非常多，其中就有基于 i^2t 计算的热保护，所以变频器输出不需要加热继电器。由于变频器输出回路中的电流一般情况下不是标准的正弦波，会导致热继电器比在三相正弦波回路中发热大，从而误动作，起不到应有保护。

二、图 3-1 中不合理的设计：

1. 主回路接触器 KM1 不建议加在变频器进线侧，而宜加在出线侧

施耐德的变频器、软起动器，主回路接触器的功能都相同：在变频器或软起动器检测到故障时受控断开，形成一个可靠的物理断点。由于 ATV21 驱动的负载是离心风机、离心泵这样的简单机械，接触器加在出线侧，控制电路会简单得多。并且故障后因控制回路仍得电，通讯保持，可获得故障代码。此接触器的作用是提高安全性和可靠性，在故障时产生一个可靠的物理断点。此接触器可以取消。

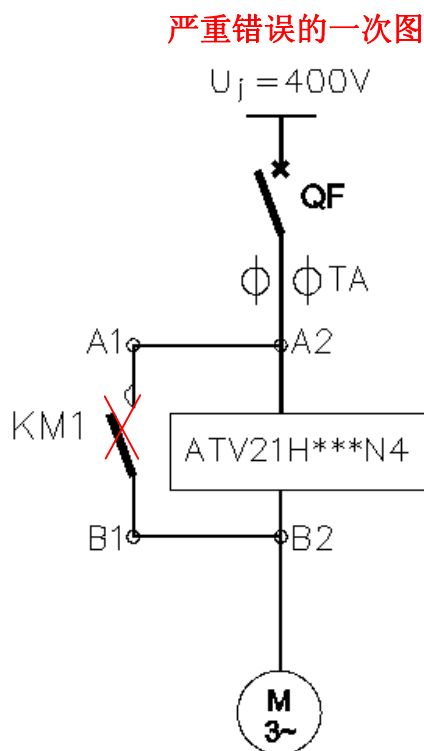


图 3-3

正确的一次图

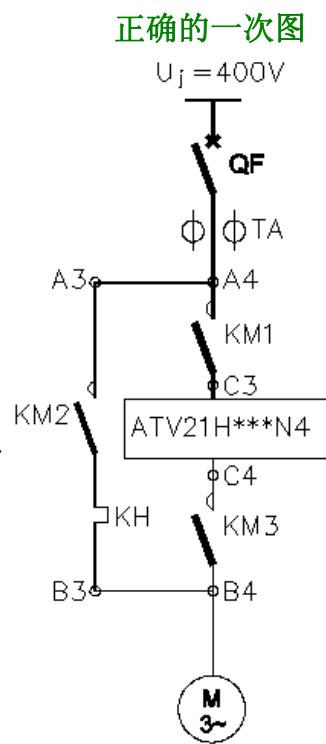


图 3-4

一、图 3-3 中严重错误的设计：

1. 将变频器旁路：用接触器直接将变频器进出线端子短接。

这是一个非常严重的错误，轻则导致变频器烧毁，重则导致变频器爆炸，造成人身伤害甚至死亡，后果非常严重。

一个非常重要的概念：旁路

旁路：在电子电路中，与一个或多个元件并联的分流通路。其特点是旁路元件与

被旁路元件电气连接点的电位相等。如图 3-4 中的 A1、A2、B1、B2 点；图 3-4 中的 A3、A4、B3、B4 点。很明显，图 3-3 所示的一次原理图会使得工作时，变频器输入、输出为同一个电气节点而致使变频器损坏，甚至爆炸。

对于变频器而言，不允许这样的电路存在。所以，对于变频器，没“旁路”一说。

在工业生产中，对于供电连续性要求很高的设备，如果采用变频器驱动，往往希望在变频器发生故障时，能迅速起动备用电路（注意是“备用电路”，而不是旁路电路），以保障生产的连续性。有的设备兼做消防，在火灾时需切换到备用电路。在一次设计中变频器必须加进线和出线接触器，电路切换时，必须先断开 KM3 和 KM1，并延时一定时间（如 2s，以去磁），再控制 KM2 闭合，对电机供电（见图 3-4）。（KM2 对“KM1+变频器+KM3”进行旁路，而不是对变频器旁路）。控制原理图参见《变频器、软起动器特殊应用 方案》中的《6.2 15KW 离心风机、或离心泵 ATV21 变频控制电气原理图（带备用电路）》。

3.1.2 施耐德电气变频器 **ATV61** 一次图常见错误设计

变频器 **ATV61** 是施耐德开发的针对工业领域，负载类型为离心风机、离心泵，性能非常优良、功能非常发达的一款变频器。**ATV61** 可广泛应用于冶金、造纸、石油化工、水泥建材、供水、水处理、工艺性空调等行业中的离心风机、离心泵。

ATV61 一次图常见错误设计主要有 5 个：

1. 加热继电器做过载保护；
2. 进线侧没有进线电抗器，或无源滤波器这样的谐波电流抑制选件；
3. 出线侧未加 dv/dt 抑制选件（虽不是必须，但必须考虑）；
4. 当需要制动停机时，未另加制动电阻（**ATV61H075N4~HC22N4**），对于 **ATV61HC25~HC63N4**，未另加制动单元和制动电阻；
5. 将变频器旁路（严重错误）。

变频器 **ATV61** 一次图常见不合理设计主要有一个：

1. 接触器加在变频器进线侧。

下面针对这些错误和不合理设计分别予以详细说明。

错误的一次图

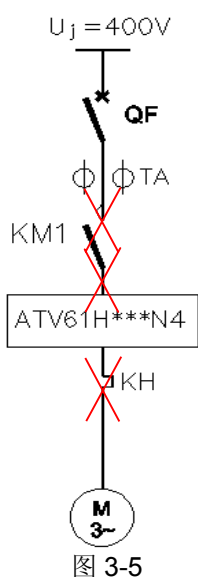


图 3-5

正确的一次图



正确的一次图

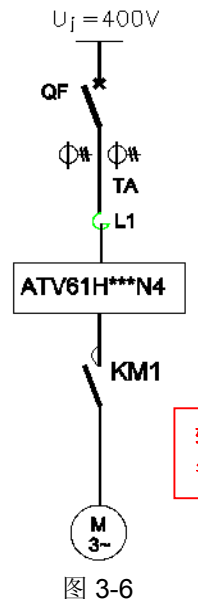


图 3-6

或

正确的一次图

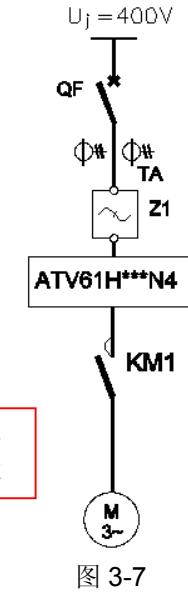


图 3-7

输出选件虽不必
需，但必须考虑

一、图 3-5 中错误的设计：

1. 变频器输出加热继电器做电机热保护

变频器一般都提供了基于 i^2t 计算的热保护，所以变频器输出不需要加热继电器。由于变频器输出回路中的电流一般情况下不是标准的正弦波，会导致热继电器比在三相正弦波回路中发热大，从而误动作，起不到应有保护。

2. 变频器输入侧没有加进线电抗器或无源滤波器

变频器输入侧会产生大量谐波电流，所以其输入侧一定需要相应的谐波电流抑制选件。对于变频器 **ATV61**，输入侧一定要配相应的选件：线路电抗器或无源滤波器。对于 **ATV61H075N4~HD75N4**（0.75~75KW），进线侧若选用了线路电抗器，建议将可选的直流电抗器加上，这样可将变频器输入侧功率因数提高到 0.95 以上；若采用无源滤波器（价格较高），应将可选的直流电抗器（价格很低）加上，这样谐波抑制效果更好。对于 **ATV61HD90N4~HC63N4**（90~630KW）进线侧若采用进线电抗器，则必须取消变频器所带的直流电抗器，对应变频器型号为：**ATV61HD90N4D~HC63N4D**。

ATV21 由于采用了专利技术抑制谐波电流，故进线侧不需要加选件来抑制谐波电流。详见《2.1.2 变频器进线侧谐波电流抑制选件》中的相关内容。

二、图 3-5 中不合理的设计：

1. 主回路接触器 KM1 不建议加在变频器进线侧，而宜加在出线侧。

施耐德的变频器、软起动器主回路接触器的功能都相同：在变频器或软起动器检测到故障时受控断开，形成一个可靠的物理断点。对于 **ATV61** 而言，由于其驱动的负载是离心风机、离心泵这些简单机械，接触器加在出线侧，控制电路会简单得多。

三、图 3-5 中应考虑的设计：

1. 变频器输出应考虑加装电机电抗器或正弦滤波器以抑制 dv/dt

变频器输出会产生过电压，过电压的大小与电机电缆的长度、类型直接相关。如果这段动力电缆超过 50 米，则应设计加装电机电抗器；超过 300 米，则应加装正弦滤波器。屏蔽电缆允许的长度更短。具体选型参见变频器样本。

结论：变频器输出侧选件必须考虑，并根据电机电缆的类型、长度决定是否选用。

2. 变频器应考虑加装制动电阻和制动单元

ATV61 用于驱动风机时，若要求制动停机，对于 **ATV61H075N4~HC22N4**，应加装制动电阻，对于 **ATV61HC25~HC63N4**，应加装制动单元和制动电阻。

严重错误的一次图

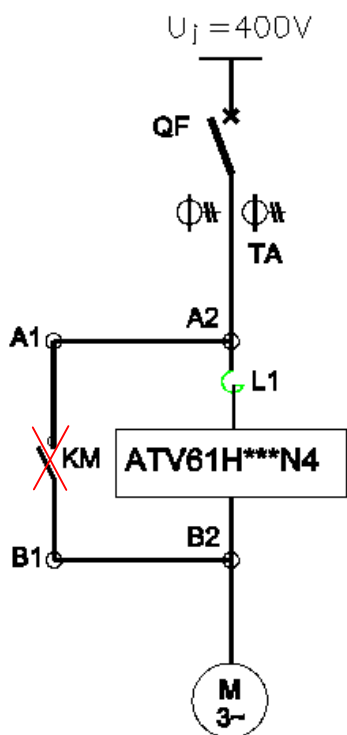


图 3-8

正确的一次图

正确的一次图

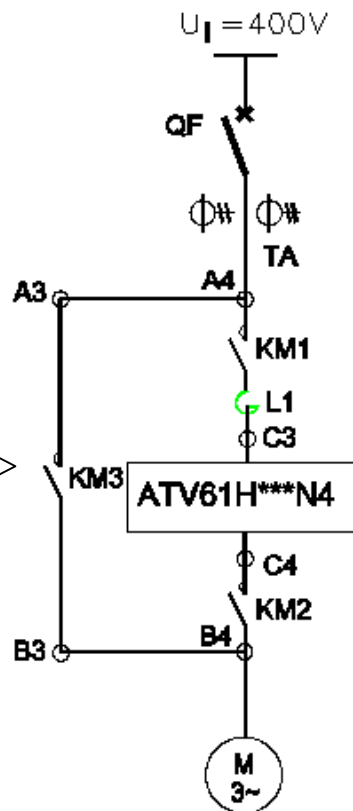


图 3-9

一、图 3-8 中严重错误的设计：

1. 将变频器旁路：用接触器直接将变频器进出线端子短接。

错误原因参见第III-4 页《ATV21 一次图常见设计错误》。

正确的控制原理图参见《变频器、软起动器特殊应用 方案》中的《6.1 15KW 离心风机 ATV61 变频控制电气原理图（带消防备用电路）》。

3.1.3 施耐德电气变频器 **ATV71** 一次图常见错误设计

ATV71 是施耐德电气开发用于工业领域中的恒转矩和复杂机械，性能非常优良、功能非常发达的一款变频器。**ATV71** 集成了大量的应用功能，具有适用于各种复杂应用的丰富选件。**ATV71** 可以在零速时输出连续额定转矩（需加编码器闭环）。**ATV71** 不仅是施耐德最高端的变频器，也是目前市场上最高端的变频器，能满足最复杂的应用需求，适宜作为最高要求的一款变频器。可广泛应用于冶金、起重、造纸、石油化工、水泥建材、水处理等行业中的复杂机械或恒转矩负载。对于罗茨风机、活塞泵、螺杆机等普通恒转矩负载，因起动转矩要求高，也应选用 **ATV71**，而不宜选用 **ATV61**。

变频器 **ATV71** 一次图常见错误设计与 **ATV61** 的一次图常见错误大体相同，主要有 5 个：

1. 加热继电器做过载保护；
2. 进线侧没有进线电抗器，或无源滤波器这样的谐波抑制附件；
3. 出线侧未加 dv/dt 抑制选件（不是必须，但需考虑）；
4. 当需要制动停机时，未另加制动电阻（**ATV71H075N4~HC16N4**），对于 **ATV71HC22N4~HC50N4**，未另加制动单元和制动电阻；
5. 将变频器旁路（严重错误）。

以上错误的详细解析请参考“**ATV61** 一次图常见错误”中的相关内容。

需要特别强调的是，变频器 **ATV71** 若用于起吊、升降等非常严酷的运行工况，对于 **ATV71H075N4~HC16N4**，必须加装加制动电阻（用于起重必须加起重电阻器，其功率更大）；对于 **ATV71HC22~HC50N4**，必须加装制动单元和制动电阻（用于起重必须加起重电阻器，其功率更大）。在下放重物过程中，由于电机运行在电磁制动状态，向变频器反馈的电功率非常大，这部分能量如果得不到有效释放，势必使得变频器直流母线电压急剧升高，使变频器损坏，甚至爆炸，产生严重后果。对于这部分能量，可以采用制动电路以热能的形式耗散，也可以采用能量回馈单元将其逆变为交流电，反馈回电网。

对于主回路的接触器，若 **ATV71** 用于驱动罗茨风机、活塞泵、螺杆机等简单的普通恒转矩机械，可以加在出线侧，这样控制电路会很简单。但当用于起重等运行工况非常严酷的情况时，应加在进线侧，以便在故障时受变频器故障触点的控制而断开，使变频器失电，以更好保护变频器和线路设备。

3.2 施耐德电气软起动器 ATS48 一次图错误设计

ATS48 是施耐德电气开发用于建筑和工业领域，理想负载为离心风机、离心泵这样的变转矩负载，性能优良、功能发达的一款软起动器。由于软起动器 ATS48 的过流能力很强，对于普通的恒转矩负载，如活塞泵、罗茨风机、螺杆机等，在不需调速时，可以选用 ATS48 软起动器。

ATS48 软起动器具有 4 个非常重要的优势：

1. 专利优势：采用转矩控制技术实现软起、软停，可以有效地消除机械冲击和机械应力，有效地消除水锤效应，延长机械设备的使用寿命（转矩控制技术，英文缩写 TCS，施耐德电气的专利技术）；
2. 保护完善：ATS48 提供相序保护，运行中提供过流、过载、缺相、欠载等完善的保护，即便旁路运行，这些保护仍然维持；
3. 可集成性强：有丰富的 I/O 口，内置 Modbus 总线，支持多种总线；
4. 可靠性高，寿命长：旁路运行可长达 20 年。

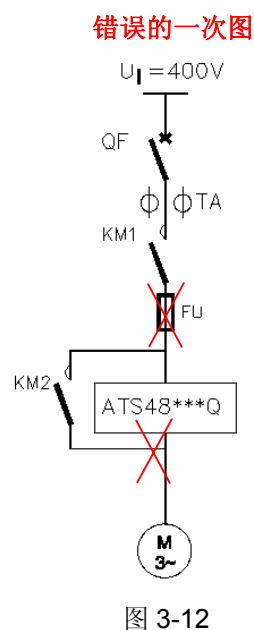
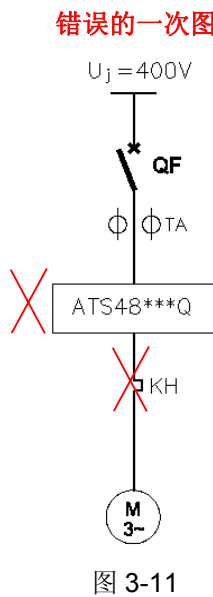
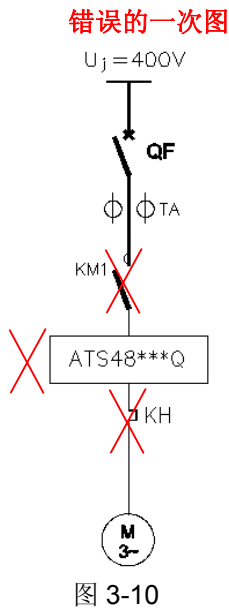
ATS48 常见的一次图错误设计主要有：

1. 加热继电器做热保护；
2. 旁路接触器出线与电机电缆连接在一起。

ATS48 一次图常见不合理设计主要有：

1. 不用旁路接触器；
2. 快速熔断器在旁路接触器外（旁路后，工作电流流过快熔）。

下面针对这些错误和不合理设计分别予以详细说明。



一、错误的设计：

1. 图 3-10、3-11 中，采用热继电器 KH 做电机过载保护。

ATS48 由于内置了电流互感器，即便旁路运行，电流仍流过互感器，基于电流检测的过载、过流、缺相、欠载等保护仍然维持，所以 ATS48 不需要加热继电器提供过载保护。

2. 图 3-12 中，旁路接触器输出连接到电机电缆接线端子。

ATS48 由于内置了电流互感器，旁路接触器出线必须接在 ATS48 的旁路端子 A2-B2-C2 上，旁路后的电流才会流过互感器。如果旁路接触器出线直接接到 ATS48 的电机电缆接线端子 2/T1-4/T2-6/T3，ATS48 会因电流不流过内置的互感器而检测不到电流，从而报“缺相”故障，导致无法运行。

3. 图 3-12 中，快速熔断器在旁路接触器外侧，旁路运行后，电流仍流过快速熔断器。

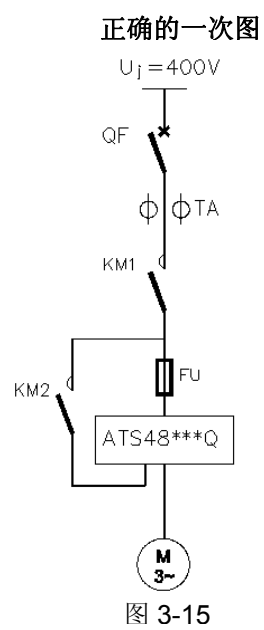
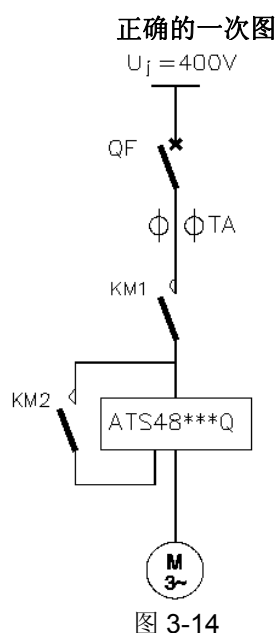
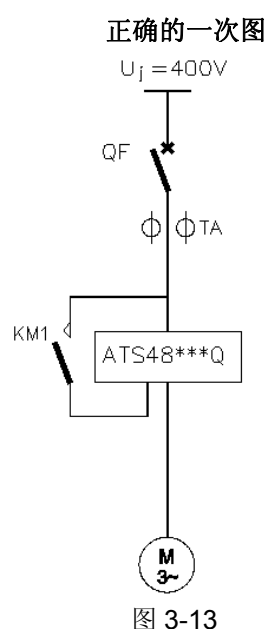
主回路的快速熔断器 FU 的作用是保护晶闸管，选型时应注意其热效应值 (i^2t 值) 应小于晶闸管的热效应值。旁路运行后，工作电流不经过晶闸管，也就不需要流经快熔。正常运行中的短路保护由空气开关提供。若在起动和停止（指软停机或制动停机，自由停机除外）过程中发生短路，由于快熔的热效应值小于晶闸管的热效应值，快熔先熔断，从而保护晶闸管。故主回路的快速熔断器 FU 应在旁路接触器内侧。

二、不合理的设计：

1. 图 3-10、11 中，没有采用旁路接触器。

ATS48 主回路有两个接触器，这两个接触器的作用不同。1. 进线接触器，受 ATS48 故障触点控制。正常时闭合，发生故障时断开。形成一个物理断点。故进线接触器的作用是提高可靠性。2. 旁路接触器，作用有两个：（1）使得工作电流不经过晶闸管，以减少软起动器的热耗散功率，延长软起动器的使用寿命。（2）使软起动器的晶闸管免受浪涌电压的冲击。旁路后晶闸管的阳极和阴极均为等电位点，雷击等浪涌电压不会损害晶闸管。

相比较而言，旁路接触器的工程实际意义更大。若非要取消一个接触器，可考虑取消进线接触器，而保留旁路接触器。



3.3 施耐德电气变频器、软起动器二次图常见错误设计

施耐德电气变频器、软起动器二次图设计，有 3 个最常见的错误：

1. 用变频器的故障触点 **R1** 直接接通主回路接触器 **KM1**（进线接触器或出线接触器）；
2. 用软起动器的故障触点 **R1** 直接接通主回路接触器 **KM1**（进线接触器）；
3. 用主回路接触器 **KM1** 的辅助触点，作为变频器或软起动器的运行信号。

正确的设计应是：

1. 用变频器故障继电器的常开触点（**R1C-R1A** 或 **FLC-FLA**），接通一个中间继电器 **KA1** 的线圈，用该继电器的常开触点（如 **5-9**），控制接触器 **KM1**（进线或出线）线圈；用变频器故障继电器的常闭触点（**R1C-R1B** 或 **FLC-FLB**）接通一个中间继电器 **KA2** 的线圈和故障指示灯，用该中间继电器（**KA2**）的常开触点（如 **5-9**）做故障输出。接触器如果用在进线侧，需另行控制其闭合。
2. 对于软起动器，应采用其故障继电器的触点（**R1C-R1A**），接通一个中间继电器 **KA1** 的线圈，用该继电器 **KA1** 的常开触点（如 **5-9**），控制（进线）接触器 **KM1** 的线圈；用该中间继电器 **KA1** 的常闭触点（如 **2-10**）接通一个中间继电器 **KA2** 的线圈和故障指示灯，用该中间继电器（**KA2**）的一个常开点（如 **5-9**）作为故障输出。
3. 变频器，或软起动器的运行信号，由另外的中间继电器的常开触点（如 **5-9**）提供，绝对不能采用主回路接触器 **KM1** 的辅助触点。也就是，变频器，或软起动器主回路得电控制，与运行控制必须严格独立。

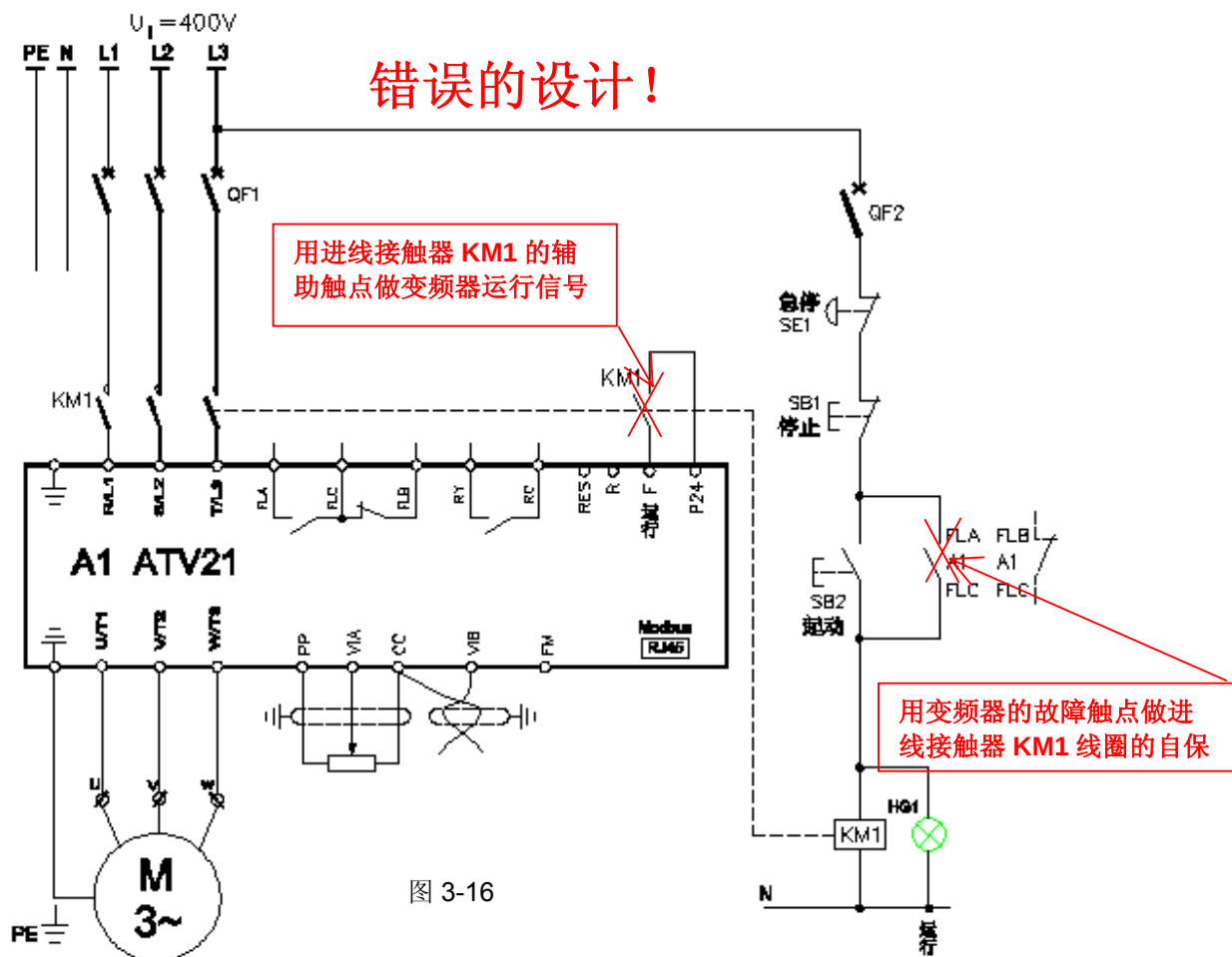
总之：变频器、软起动器控制原理图的设计必须遵循两个原则：**1. 主回路如果用了接触器，主回路与运行必须单独控制，这二者之间不能有任何联系。2.主回路接触器断开有两种情形：（1）故障时受故障触点 **R1** 控制而断开；（2）正常停机后，如需断开主回路，则正常断电而断开主回路接触器。**

本书提供的变频器、软起动器控制原理图一定正确、科学、合理，请用户尽可能参考并采用这些图纸。如果必须修改才能满足控制要求，绝对不要去修改主回路接触器和起停的控制逻辑，除非，能确信，对主回路接触器和起停的控制逻辑的修改是正确的。

下面过通过实际电路的详细分析，分别予以说明。

3.3.1 施耐德电气变频器 ATV21 二次图常见错误设计

(一)



一、图 3-16 中错误的设计:

1. 用变频器的故障触点 FLC-FLA 做进线接触器 KM1 线圈的自保, 这会导致两个后果: (1) 无法启动变频器: 按下启动按钮 SB2, KM1 吸合; 松开 SB2, KM1 断开。变频器主回路未得电。为使 KM1 吸合成功, 便按住 SB2 不放, 无论按住多久, 变频器都不运行。查看变频器显示面板, 闪烁故障代码, 变频器处于锁定状态。(2) 由于变频器内部电容频繁充放电, 变频器很快损坏。
2. 用进线接触器 KM1 的辅助触点作为运行信号, 导致变频器主回路一通电就接收到运行信号。此时变频器尚未准备就绪, 变频器报故障而锁定, 不能启动。
3. 为了隐藏(注意是隐藏, 不是纠正)上述错误, 使变频器能够运行, 于是就有了图 3-17 的错误: 进线接触器带一个延时辅助触点, 用该延时触点作为变频器的运行信号。详见对图 3-17 的分析。

(二)

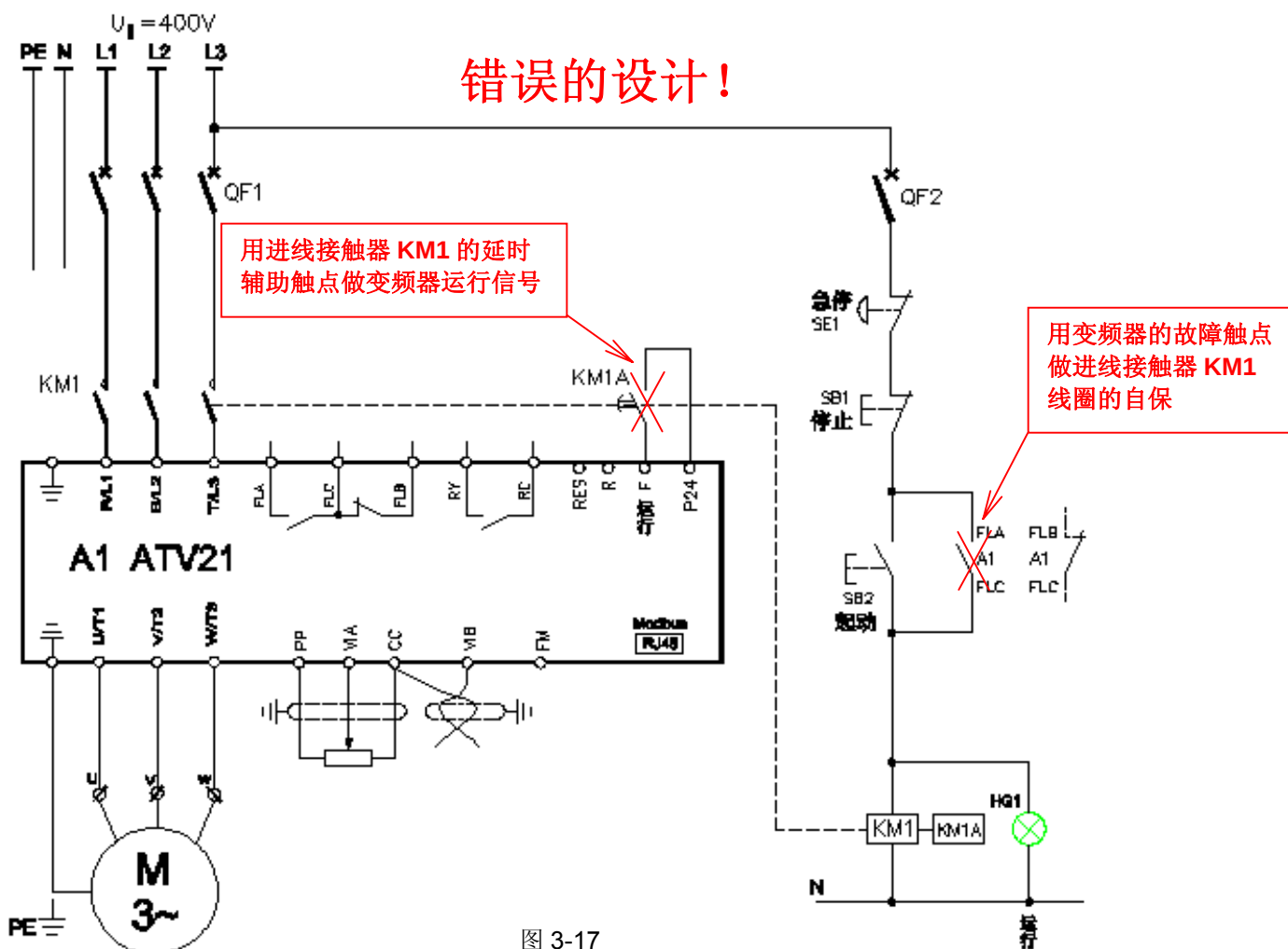


图 3-17

一、图 3-17 中错误的设计：

1. 用变频器的故障触点 FLC-FLA 做进线接触器 KM1 线圈的自保。按下启动按钮 SB2，KM1 吸合；松开 SB2，KM1 断开。变频器主回路未得电。为使 KM1 吸合成功，便按住 SB2 不放，约 10 秒钟（功率越大时间越长），变频器运行，然后松开 SB2。
2. 若发现变频器不能启动，便延长接触器 KM1 的延时触点的延时时间，直到变频器能运行为止。
3. 停机时按下 SB1，变频器失电，负载只能自由停机，不能受控停机。对于水泵，产生严重的水锤效应，严重缩短水泵、阀门的使用寿命。
4. 故障后变频器失电，不能获得故障指示和故障输出信号。
5. 故障后变频器失电，通讯丢失。
6. 变频器寿命严重缩短。
7. 为了能按下 SB2 就可以松手，于是就有了图 3-18 的不合理设计：用进线接触器 KM1 的辅助触点自保。详见对图 3-18 的分析。

(三)

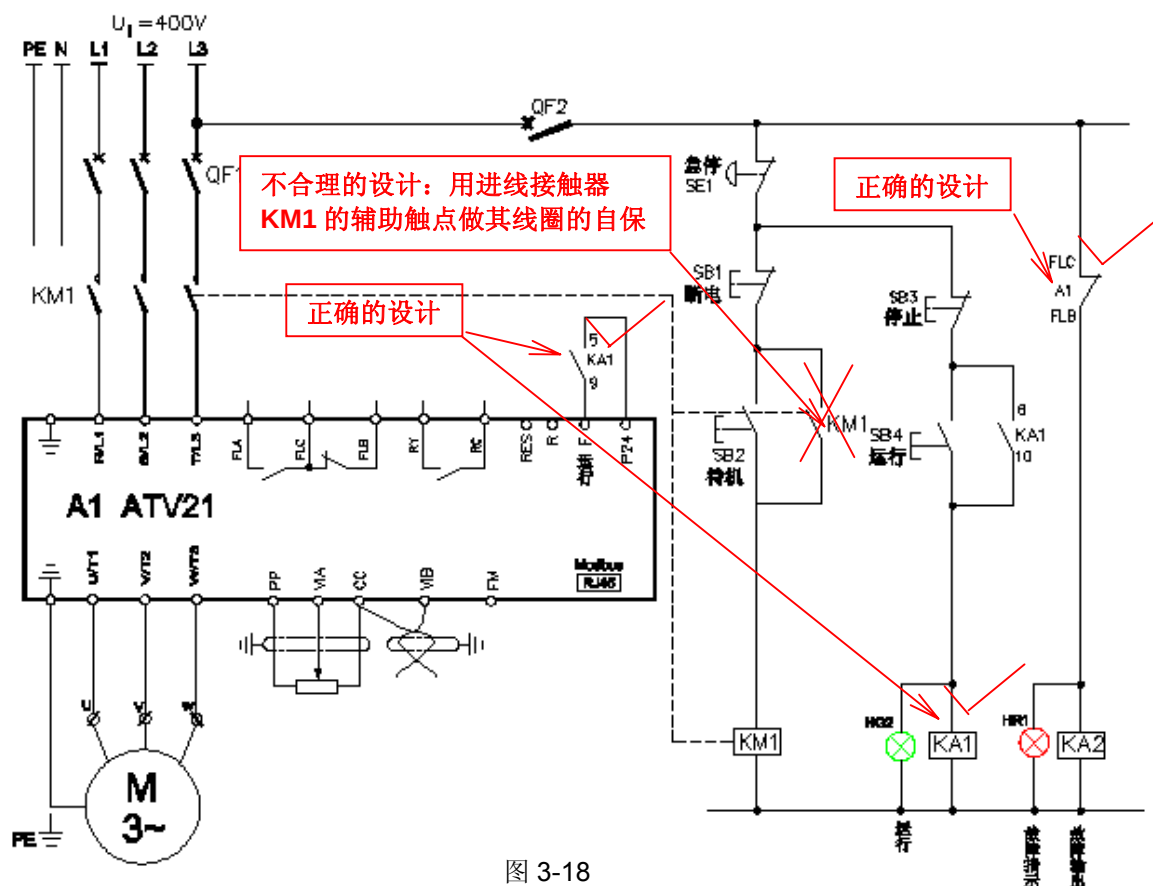


图 3-18

一、图 3-18 中的不合理设计：

用进线接触器 KM1 的辅助触点做其线圈的自保，进线接触器 KM1 不受变频器故障触点的控制，与变频器故障触点的设计功能不相符，变频器发生故障时该接触器不会断开。

二、图 3-18 中正确的设计：

1. 变频器的运行控制与变频器得电控制互相独立：变频器的运行命令由中间继电器 KA1 给出，与主回路接触器的控制无关；
2. 变频器故障触点 FLC-FLB 控制故障指示灯和故障输出继电器 KA2 的线圈，用以指示和输出故障信号。

三、关于故障触点 FLC-FLA/FLC-FLB 动作逻辑的说明

该故障触点的公共端为 FLC，FLC-FLA 为常开触点，FLC-FLB 为常闭触点。变频器无故障，该触点动作：常开触点 FLC-FLA 闭合，常闭触点 FLC-FLB 断开。变频器充电过程中、或失电后、或故障时，该触点复位（FLC-FLA 断开，FLC-FLB 闭合）。

在变频器主回路得电、尚在充电过程中，该触点未动作。图 3-18 电路中，FLC-FLB 处于闭合状态，故障指示灯亮，KA2 线圈被接通，输出一个故障信号。有人认为，这时变频器不应该报故障。但如果把自己假想成变频器，就能理解为什么变频器在这种状态下会报故障：充电过程中变频器尚不具备运行条件，肯定应该报故障。无故障表示变频器具备运行条件。待变频器充满电，无其它故障，该故障触点动作，故障消失。

(四)

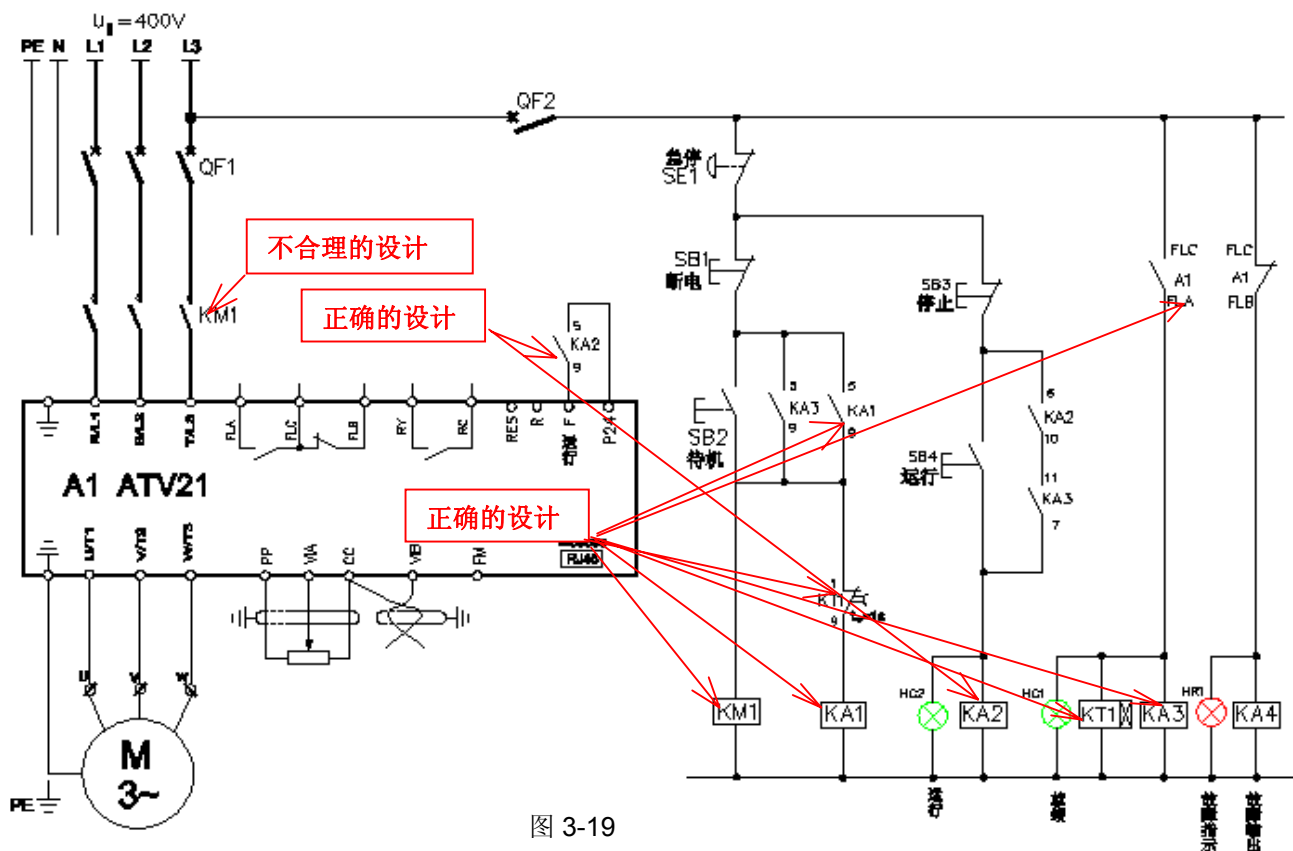


图 3-19

一、图 3-19 中正确的设计：

1. 变频器进线接触器单独控制，并受变频器故障触点控制。起/停控制对接触器无影响，故障时受变频器故障触点控制而断开。
2. 变频器的运行控制与变频器得电控制互相独立：变频器的运行命令由中间继电器 KA2 给出，与主回路无关；
3. 注意中间继电器 KA1、KA3 和时间继电器 KT1 的作用。
4. 变频器故障触点 FLC-FLB 控制故障指示灯和故障输出继电器 KA4 的线圈，用以指示和输出故障信号。

二、图 3-19 中的不合理设计：采用进线接触器

进线接触器 KM1 受变频器故障触点的控制，故障时受控断开，变频器主回路失电。因变频器控制回路 +24V 电源来自变频器内部直流母线（通过 DC to DC 获得），故控制回路亦失电，通讯丢失，不能获得故障代码。ATV21 用于驱动离心风机、离心泵这样的简单机械，建议采用出线接触器（ATV21 不能单独提供 +24V 控制电源）。

三、关于故障触点 FLC-FLA/FLC-FLB 动作逻辑的说明

该故障触点的公共端为 FLC，FLC-FLA 为常开触点，FLC-FLB 为常闭触点。变频器无故障，该触点动作：常开触点 FLC-FLA 闭合，常闭触点 FLC-FLB 断开。变频器充电过程中、或失电后、或故障时，该触点复位（FLC-FLA 断开，FLC-FLB 闭合）。

在变频器主回路得电、尚在充电过程中，该故障触点未动作。图 3-19 电路中，FLC-FLB 处于闭合状态，故障指示灯亮，KA4 线圈被接通，输出一个故障信号。有人认为，这时变频器不应该报故障。但如果把自己假想成变频器，就能理解为什么变频器在这种状态下会报故障：充电过程中变频器尚不具备运行条件，肯定应该报故障；无故障表示变频器具备运行条件。待变频器充满电，无其它故障，该故障触点动作，故障消失。

(五)

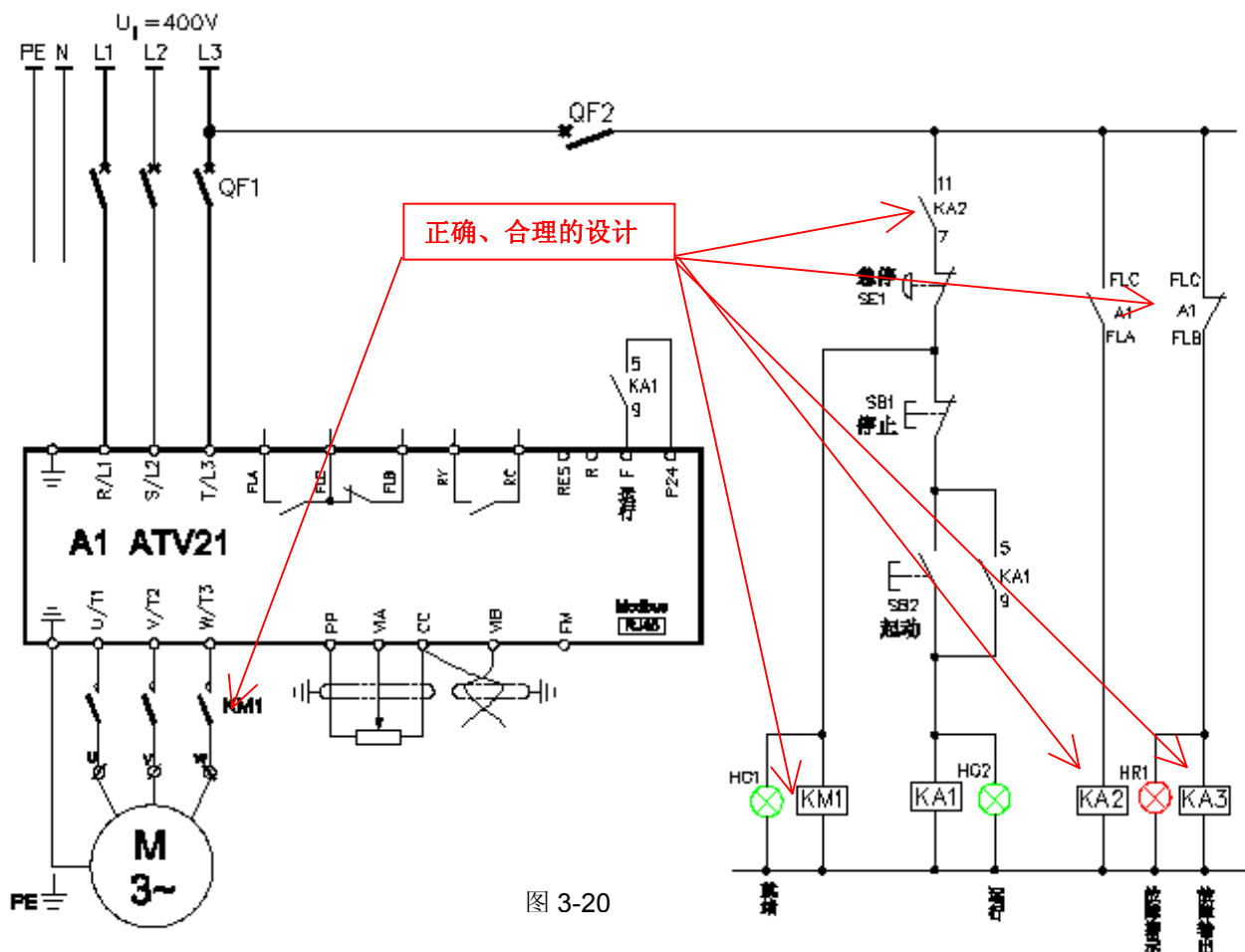


图 3-20

一、图 3-20 中，正确的设计：

1. 变频器出线接触器 KM1 单独控制，并受变频器故障触点控制。主回路空气开关 QF1、控制回路空气开关 QF2 合上，变频器主回路、控制回路得电。变频器主回路充满电后，没有检测到其它故障，其故障触点 FLC-FLA/FLC-FLB 动作：FLC-FLA/闭合，主回路接触器 KM1 被接通；FLC-FLB 断开，故障消失。故障时，KM1 受变频器故障触点控制而断开，形成一个可靠的物理断点。
2. 起/停控制通过 KA1 完成，对接触器无影响。
3. 变频器的运行控制与变频器得电控制互相独立：变频器的运行命令由中间继电器 KA1 给出，与主回路接触器无关。
4. 变频器故障触点 FLC-FLB 控制故障指示灯和故障输出继电器 KA3 的线圈，用以指示和输出故障信号。
5. 故障时，变频器故障继电器动作，中间继电器 KA2 断开，控制出线接触器 KM1 断开。ATV21 主回路保持得电，通讯保持，并可获得故障代码（ATV21 用于驱动离心风机、离心泵这样的简单机械，采用出线接触器是恰当的）。

三、关于故障触点 FLC-FLA/FLC-FLB 动作逻辑的说明

该故障触点的公共端为 FLC，FLC-FLA 为常开触点，FLC-FLB 为常闭触点。变频器无故障，该触点动作：常开触点 FLC-FLA 闭合，常闭触点 FLC-FLB 断开。变频器充电过程中、或失电后、或故障时，该触点复位（FLC-FLA 断开，FLC-FLB 闭合）。

在变频器主回路得电、尚在充电过程中，该故障触点未动作。图 3-20 电路中，FLC-FLB 处于闭合状态，故障指示灯亮，KA3 线圈被接通，输出一个故障信号。有人认为，这时变频器不应该报故障。但如果把自己假想成变频器，就能理解为什么变频器在这种状态下会报故障：充电过程中变频器尚不具备运行条件，肯定应该报故障。无故障表示变频器具备运行条件。待变频器充满电，无其它故障，该故障触点动作，故障消失。

3.3.2 施耐德电气变频器 ATV61/71 二次图常见错误设计

变频器 ATV61 适用于工业领域中的离心风机、离心泵等简单机械。对于建筑领域中大于 75KW 的离心风机、离心泵，如果选用变频器，也应采用 ATV61。

变频器 ATV71 适用于恒转矩负载和复杂机械，如罗茨风机、活塞泵、起重设备、电梯、传送带等。ATV71 是施耐德，也是目前市面上最高端的一款变频器。

ATV61/71 二次图常见设计错误与变频器 ATV21 大体相同，主要有：

1. 用故障触点 R1 的常开点 R1C-R1A 直接控制进线接触器 KM1；
2. 用 KM1 的辅助触点做变频器运行信号。

正确的设计应是：

1. 用变频器 ATV61/71 的故障继电器的常开触点（R1C-R1A），接通一个中间继电器 KA1 的线圈，用该继电器的常开触点（如 5-9），控制（进线或出线）接触器 KM1 线圈；用变频器故障继电器的常闭触点（R1C-R1B）接通一个中间继电器 KA2 的线圈和故障指示灯，用该中间继电器（KA2）的常开触点（如 5-9）做故障输出。接触器如果用在进线侧，需单独控制其闭合。
2. 变频器 ATV61/71 的运行信号，由另外的中间继电器的常开触点（如 5-9）提供，绝对不能采用主回路接触器 KM1 的辅助触点。也就是，变频器主回路得电控制，与运行控制必须严格独立。

总之：变频器控制原理图的设计必须遵循两个原则：1. 变频器主回路如果用了接触器，主回路与运行必须单独控制，这二者之间不能有任何联系。2. 主回路接触器断开有两种情形：（1）故障时受变频器故障触点控制而断开；（2）正常停机后，如需断开主回路，则执行正常断电操作而使得主回路路接触器断开。

由于 ATV61 用于驱动工业中的离心风机、离心泵这样的简单机械，主回路的接触器建议放在出线侧，这样控制电路要简单得多。

ATV71 用于起重等运行工况非常严酷的场合时，主回路的接触器应放在进线侧，并受故障触点的控制；当用于驱动罗茨风机、活塞泵这些简单机械时，主回路的接触器建议放在出线侧，这样控制电路要简单得多。

下面，对这些错误或不合理设计做详细说明。

错误的設計！

错误的設計

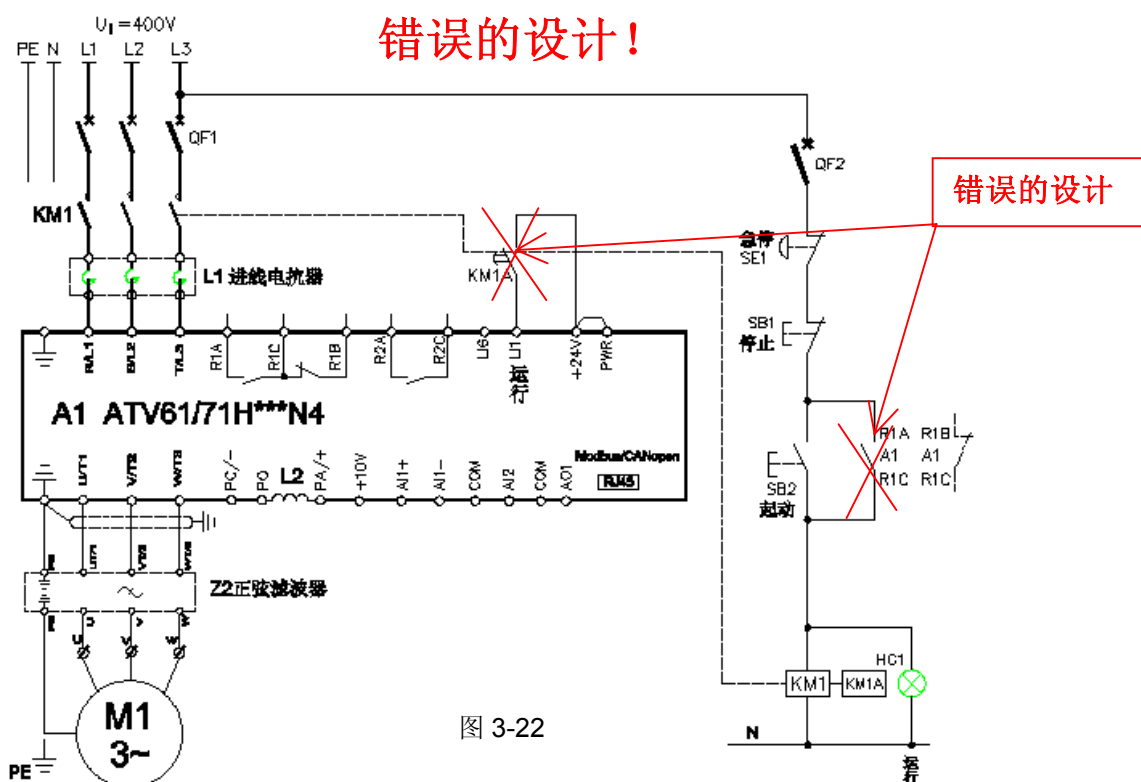
图 3-21

图 3-21

1. 用变频器的故障触点 R1C-R1A 用做进线接触器 KM1 线圈的自保，这会导致两个后果：
(1) **无法起动作变频器**：按下起动按钮 SB2，KM1 吸合；松开 SB2，KM1 断开。变频器主回路未得电。为使 KM1 吸合成功，便按住 SB2 不放，无论按住多久，变频器都不运行。查看变频器显示面板，闪烁故障代码，变频器处于锁定状态。
(2) 由于变频器内部电容频繁充放电，**变频器很快损坏**。
2. 用进线接触器 KM1 的辅助触点作为运行信号，导致变频器主回路一通电接收到运行信号。此时变频器尚未准备就绪，变频器报故障而锁定，**不能起动**。
3. 为了隐藏（注意是隐藏，不是纠正）上述错误，使变频器能够运行，于是就有了图 3-22 的错误：进线接触器带一个延时辅助触点，用该延时触点作为变频器的运行信号。详见对图 3-22 的分析。

该故障触点的公共端为 R1C, R1C-R1A 为常开触点, R1C-R1B 为常闭触点。变频器无故障, 该触点动作: 常开触点 R1C-R1A 闭合, 常闭触点 R1C-R1B 断开。变频器充电过程中、或失电后、或故障时, 该触点复位 (R1C-R1A 断开, R1C-R1B 闭合)。

(二)



一、图 3-22 中错误的设计:

1. 用变频器的故障触点 **R1C-R1A** 做进线接触器 **KM1** 线圈的自保。按下启动按钮 **SB2**, **KM1** 吸合; 松开 **SB2**, **KM1** 断开。变频器主回路未得电。为使 **KM1** 吸合成功, 便按住 **SB2** 不放, 约 10 秒钟 (功率越大时间越长), 变频器运行, 然后松开 **SB2**。
2. 若发现变频器不能起动, 便延长接触器 **KM1** 辅助延时触点的延时时间, 直到变频器能运行为止。
3. 停机时按下 **SB1**, 变频器失电, 负载只能自由停机, 不能受控停机。对于水泵, 产生严重的水锤效应, 严重缩短水泵、阀门的使用寿命。
4. 故障后变频器失电, 不能获得故障指示和故障输出信号。
5. 故障后变频器失电, 通讯丢失, 不能获得故障信息。
6. 变频器寿命严重缩短。

为了能按下 **SB2** 就可以松手，于是就有了图 3-23 的不合理设计：用进线接触器 **KM1** 的辅助触点自保。详见对图 3-23 的分析。

二、关于故障触点 R1C-R1A/R1C-R1B 动作逻辑的说明

该故障触点的公共点位 **R1C**，**R1C-R1A** 为常开触点，**R1C-R1B** 为常闭触点。变频器无故障，该触点动作：常开触点 **R1C-R1A** 闭合，常闭触点 **R1C-R1B** 断开。变频器充电过程中、或失电后、或故障时，该触点复位（**R1C-R1A** 断开，**R1C-R1B** 闭合）。

(三)

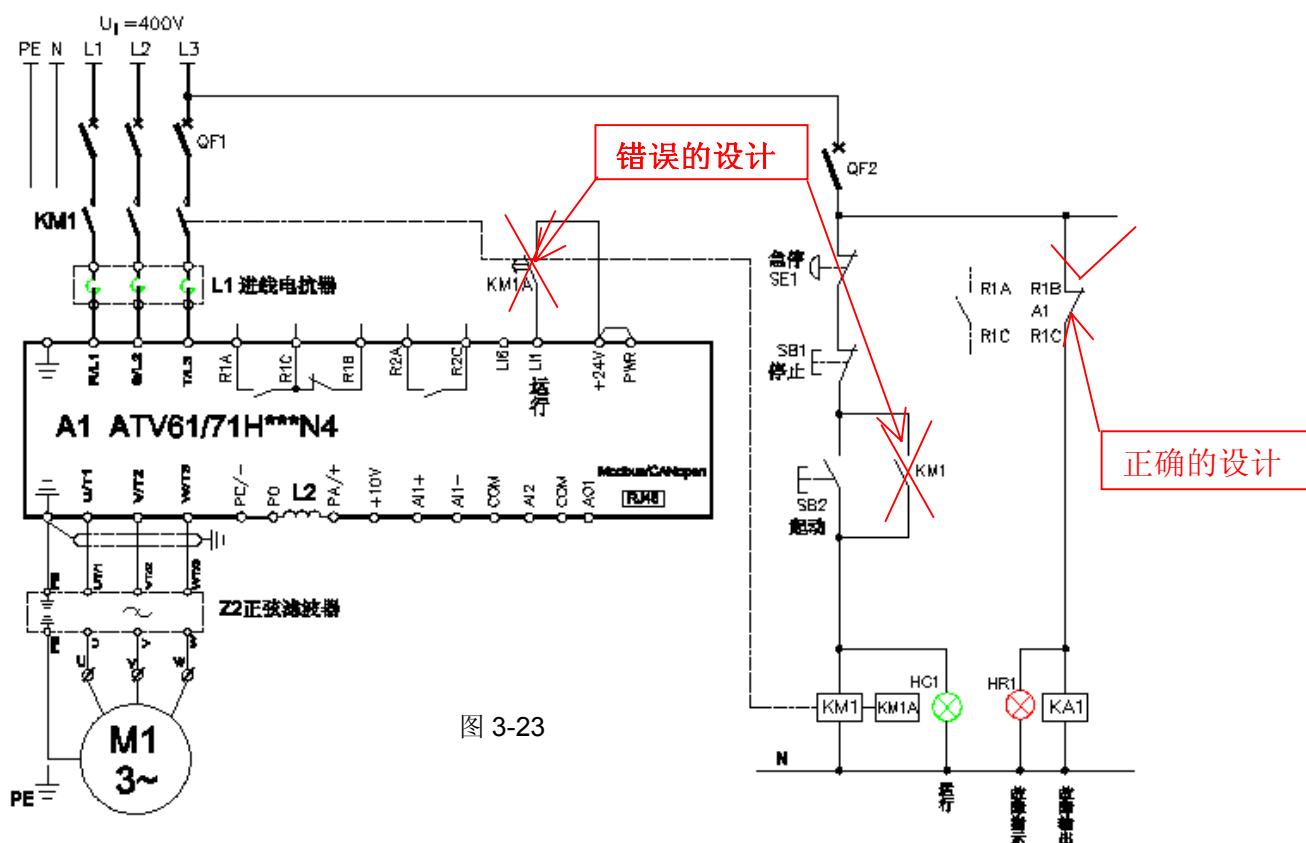


图 3-23

一、图 3-23 中错误的设计：

1. 用进线接触器 KM1 的延时辅助触点做运行信号。若发现变频器不能起动，便延长接触器 KM1 辅助延时触点的延时时间，直到变频器能运行为止。
2. 停机时按下 SB1，变频器失电，负载只能自由停机，不能受控停机。对于水泵，产生严重的水锤效应，严重缩短水泵、阀门的使用寿命。

二、图 3-23 中的不合理设计：

用进线接触器 KM1 的辅助触点做其线圈的自保，进线接触器 KM1 不受变频器故障触点的控制，与变频器故障触点的设计功能不相符：变频器发生故障时该接触器不会断开。

三、图 3-23 中正确的设计：

1. 变频器故障触点 R1B-R1C 控制故障指示灯和故障输出继电器 KA1 的线圈，用以指示和输出故障信号。

四、关于故障触点 R1C-R1A/R1C-R1B 动作逻辑的说明

该故障触点的公共点位 R1C，R1CC-R1A 为常开触点，R1C-R1B 为常闭触点。变频器无故障，该触点动作：常开触点 R1C-R1A 闭合，常闭触点 R1C-R1B 断开。变频器充电过程中、或失电后、或故障时，该触点复位（R1C-R1A 断开，R1C-R1B 闭合）。

在变频器主回路得电、尚在充电过程中，该触点未动作，图 3-23 电路中，R1C-R1B 处于闭合状态，故障指示灯亮，KA1 线圈被接通，输出一个故障信号。有人认为，这时变频器不应该报故障。但如果把自己假想成变频器，就能理解为什么变频器在这种状态下会报故障：充电过程中变频器尚不具备运行条件，肯定应该报故障。无故障表示变频器具备运行条件。待变频器充满电，无其它故障，该故障触点动作，故障消失。

(四)

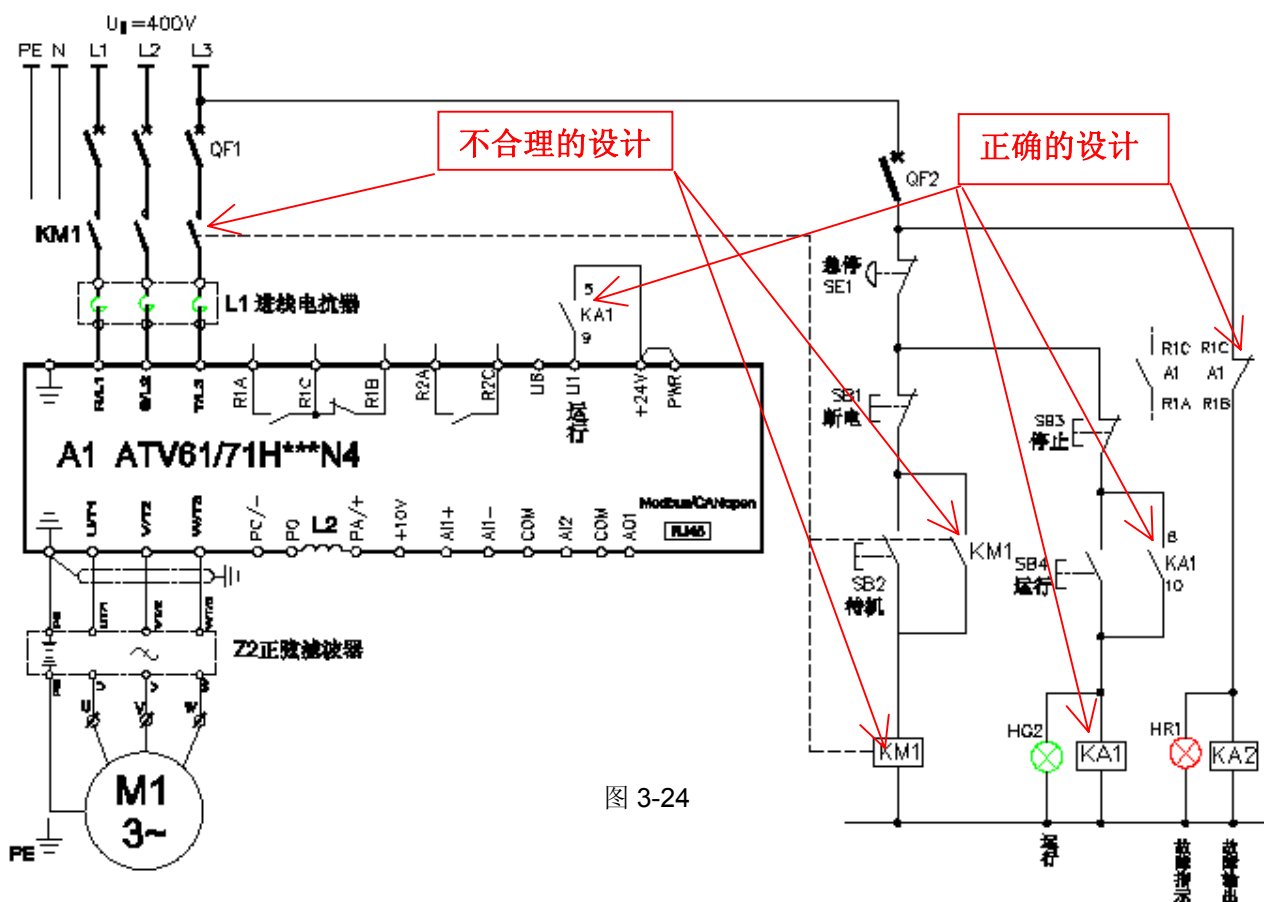


图 3-24

一、图 3-24 中的不合理设计：

用进线接触器 KM1 的辅助触点做其线圈的自保，进线接触器 KM1 不受变频器故障触点的控制，与变频器故障触点的设计功能不相符：变频器发生故障时该接触器不会断开。

二、图 3-24 中正确的设计：

1. 变频器的运行控制与变频器得电控制互相独立：变频器的运行命令由中间继电器 KA1 给出，与主回路的控制无关；
2. 变频器故障触点 R1C-R1B 控制故障指示灯和故障输出继电器 KA1 的线圈，用以指示和输出故障信号。

三、关于故障触点 R1C-R1A/R1C-R1B 动作逻辑的说明

该故障触点的公共端为 R1C，R1C-R1A 为常开触点，R1C-R1B 为常闭触点。变频器无故障，该触点动作：常开触点 R1C-R1A 闭合，常闭触点 R1C-R1B 断开。变频器充电过程中、或失电后、或故障时，该触点复位（R1C-R1A 断开，R1C-R1B 闭合）。

在变频器主回路得电、尚在充电过程中，该触点未动作。图 3-24 电路中，R1C-R1B 处于闭合状态，故障指示灯亮，KA2 线圈被接通，输出一个故障信号。有人认为，这时变频器不应该报故障。但如果把自己假想成变频器，就能理解为什么变频器在这种状态下会报故障：充电过程中变频器尚不具备运行条件，肯定应该报故障。无故障表示变频器具备运行条件。待变频器充满电，无其它故障，该故障触点动作，故障消失。

(五)

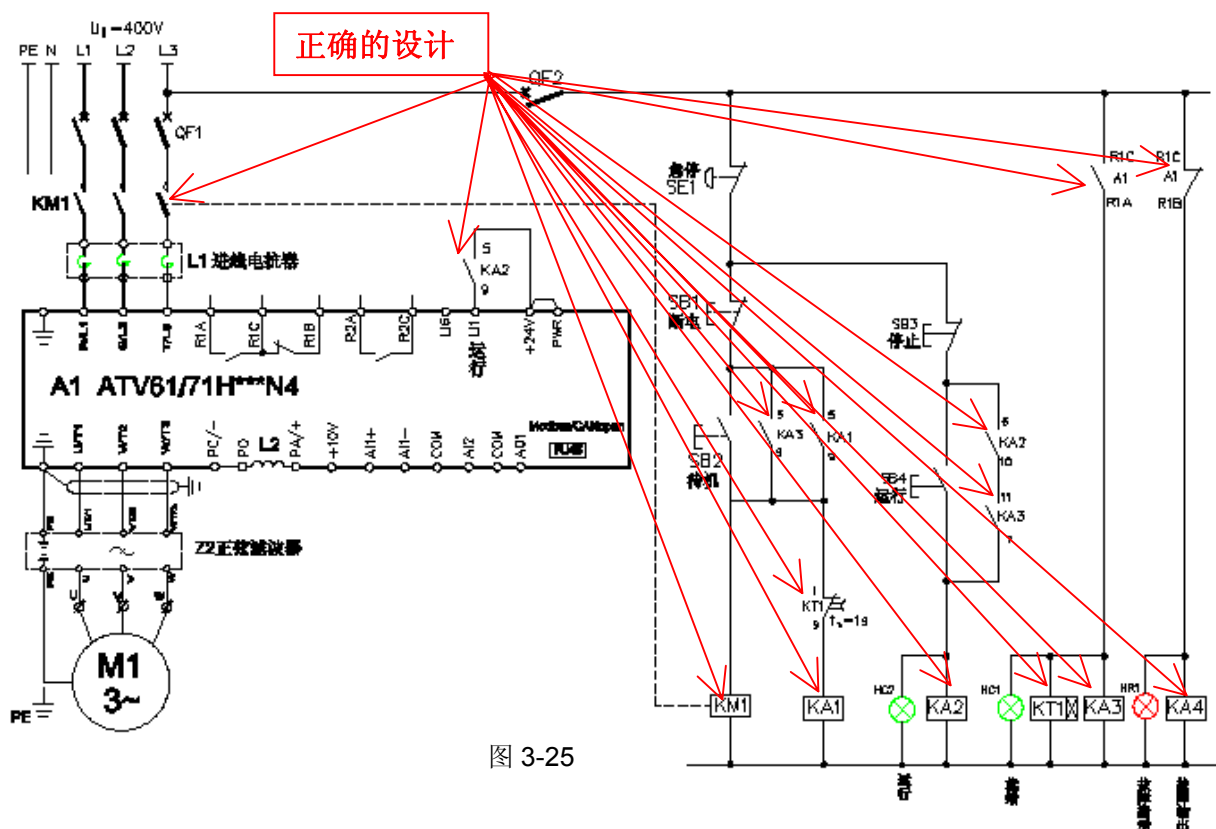


图 3-25

一、图 3-25 中正确的设计：

1. 变频器进线接触器单独控制，并受变频器故障触点控制。起/停控制对接触器无影响，故障时受变频器故障触点控制而断开。
2. 变频器的运行控制与变频器得电控制互相独立：变频器的运行命令由中间继电器 KA2 给出，与主回路接触器的控制无关；
3. 注意中间继电器 KA1、KA3 和时间继电器 KT1 的作用。
4. 变频器故障触点 R1C-R1B 控制故障指示灯和故障输出继电器 KA4 的线圈，用以指示和输出故障信号。

二、图 3-25 中的不合理设计：故障后接触器断开，不能获得故障代码

进线接触器 KM1 受变频器故障触点的控制，故障时受控断开，变频器主回路失电。因变频器控制回路+24V 电源来自变频器内部直流母线（通过 DC to DC 获得），故控制回路亦失电，通讯丢失，不能获得故障代码。

故 ATV61/71 若采用进线接触器，控制电源应由一个外部+24V 电源单独提供，以确保故障时接触器受控断开后，变频器的控制回路仍得电而可获得故障代码。

对于 ATV61，因其所带负载为离心风机、离心泵这样的简单机械，接触器建议加在出线侧，这样控制电路会非常简单。

对于 ATV71，如果所带的负载为罗茨风机、活塞泵、螺杆机等这样简单的恒转矩负载，也建议将接触器加在出线侧。

(六)

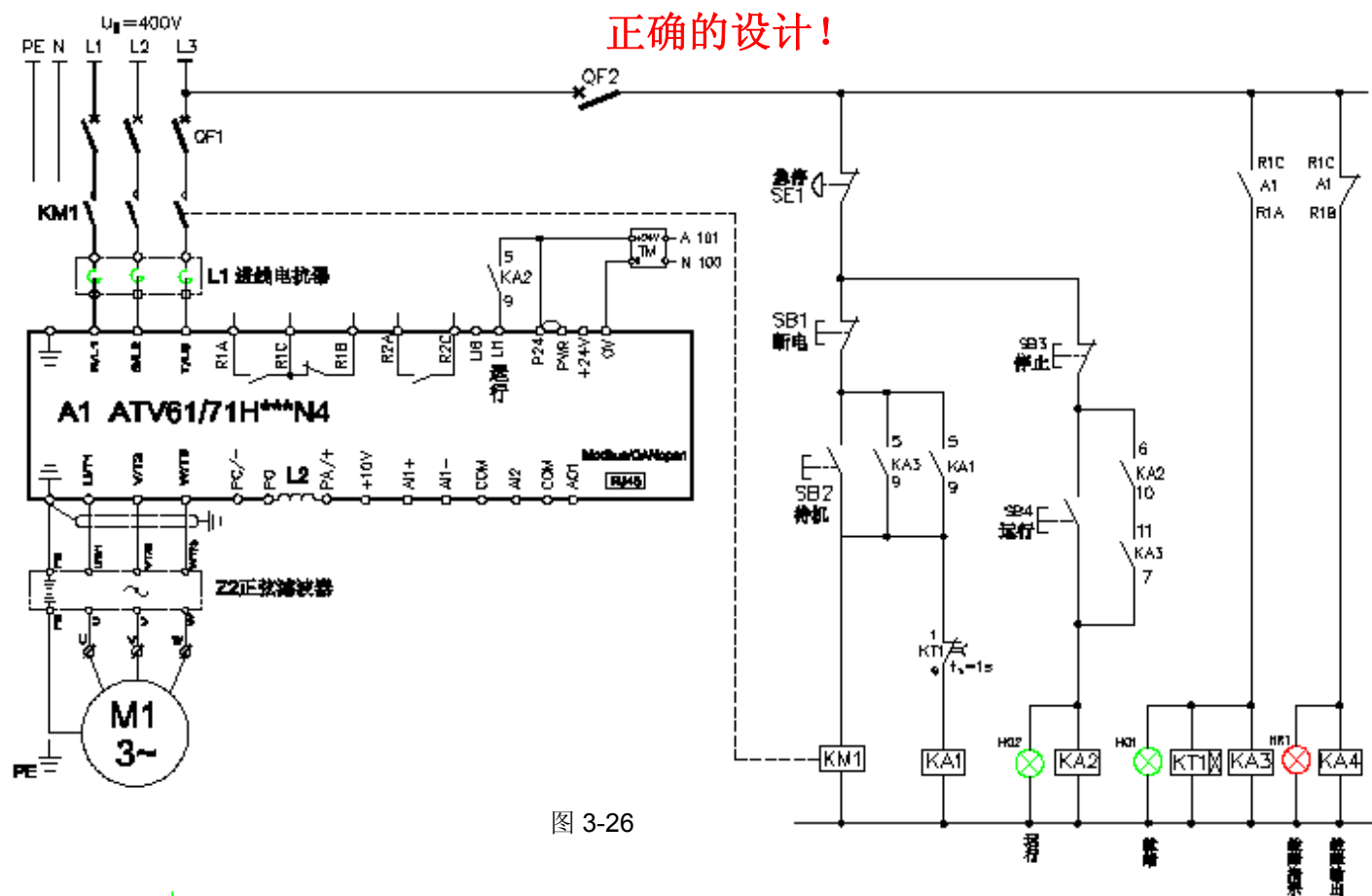


图 3-26

一、图 3-26 中正确的设计:

1. 变频器进线接触器单独控制，并受变频器故障触点控制。起/停控制对接触器无影响，故障时受变频器故障触点控制而断开。
2. 变频器的运行控制与变频器得电控制互相独立：变频器的运行命令由中间继电器 KA2 给出，与主回路接触器的控制无关；
3. 注意中间继电器 KA1、KA3 和时间继电器 KT1 的作用。
4. 变频器故障触点 R1C-R1B 控制故障指示灯和故障输出输出继电器 KA4 的线圈，用以指示和输出故障信号。
5. 变频器控制回路单独由+24V 直流电源供电。障时接触器受控断开后，变频器的控制回路仍得电而可获得故障代码。

二、建议

1. 对于 ATV61，因其所带负载为离心风机、离心泵这些简单机械，接触器建议加在出线侧，这样控制电路会非常简单。
2. 对于 ATV71，如果所带的负载为罗茨风机、活塞泵、螺杆机等简单的恒转矩负载，也建议将接触器加在出线侧。见下页图 3-27。

Figure 3-27 is a detailed electrical control circuit diagram for a motor. The main power supply is 400V ($U_1=400V$) with phases PE, N, L1, L2, L3. The circuit includes a main switch QF1, a circuit breaker QF2, and a thermal relay KA1. The motor is connected through a contactor KM1 and a thermal relay KA1. The control circuit is protected by a fuse and includes a stop button SB1, a start button SB2, and a thermal relay KA1. The motor is labeled M1 3~.

图 3-27

1. 变频器进线接触器单独控制，并受变频器故障触点控制。起/停控制对接触器无影响，故障时受变频器故障触点控制而断开。
2. 变频器的运行控制与变频器得电控制互相独立：变频器的运行命令由中间继电器 **KA1** 给出，与主回路接触器的控制无关；
3. 变频器故障触点 **R1C-R1B** 控制故障指示灯和故障输出输出继电器 **KA3** 的线圈，用以指示和输出故障信号。
4. 变频器控制回路由+24V 直流电源单独供电。障时接触器受控断开后，变频器的控制回路仍得电而可获得故障代码。

1. 对于 **ATV61**，因其所带负载为离心风机、离心泵这样的简单机械，接触器加在出线侧，控制电路会非常简单。
2. 对于 **ATV71**，如果所带的负载为罗茨风机、活塞泵、螺杆机等这样简单的恒转矩负载，也建议将接触器加在出线侧。
3. 但，如果 **ATV71** 用于起重等运行工况很严酷的场合，应采用进线接触器，并外加+24V 控制电源。见图 3-26。

3.3.3 施耐德电气软起动器 ATS48 二次图常见错误设计

施耐德软起动器 ATS48 二次图设计，有 3 个最常见的错误：

1. 用软起动器的故障触点 **R1** 直接接通主回路接触器 **KM1**（进线接触器）；
2. 用主回路接触器 **KM1** 的辅助触点，作为变频器或软起动器的运行信号；
3. 旁路接触器与电机电缆并接在一起。

不合理设计有：

1. 用软起动器的旁路继电器 **R2** 直接带旁路接触器。这样会严重缩短 **R2** 的使用寿命。

总之：软起动器控制原理图的设计与变频器一样，必须遵循两个原则：**1.** 进线侧如果用了接触器，该接触器与运行必须单独控制，这二者之间不能有任何联系。**2.** 主回路接触器断开有两种情形：（**1**）故障时受软起动器故障触点 **R1** 控制而断开；（**2**）正常停机后，如需断开主回路，则正常断电而断开主回路路接触器。

下面针对这些错误和不合理设计做相应说明。

(一)

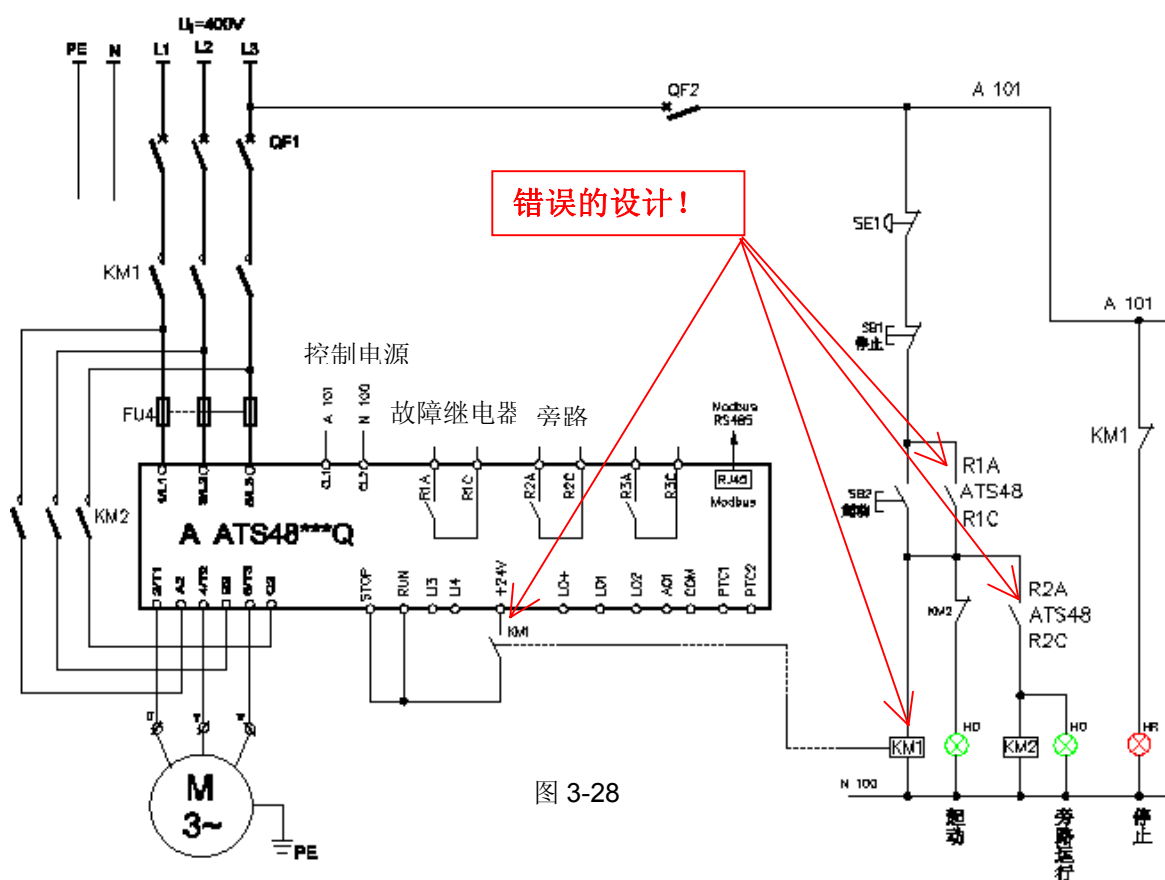


图 3-28

一、图 3-28 中错误的设计：

1. 用 ATS48 的故障触点 R1A-R1C 直接控制进线接触器 KM1；
2. 用进线接触器 KM1 的辅助触点作为 ATS48 的运行信号；
3. 因 ATS48 的故障触点 R1A-R1C 用于控制进线接触器 KM1，故无法获得故障指示和故障信号；
4. 按下起动按钮，KM1 吸合。KM1 的辅助触点完全有可能先于主触点闭合，即：软起动器得到运行信号但主回路尚未得电，导致 ATS48 报故障“主回路无电源”，起动不成功。这种情况在实际工程中经常遇到。
5. 按下停止按钮，KM1 即断开，软起动器失电，无法控制水泵软停；

二、图 3-28 中不合理的设计：

1. 用软起动器 ATS48 的旁路触点 R2 直接带旁路接触器 KM2 的线圈，容易导致 R2 被烧毁。

三、注意：

ATS48 由于内置了电流互感器，旁路接触器出线必须接在 ATS48 的旁路端子 A2-B2-C2 上，旁路后主回路电流才会流过互感器。

如果旁路接触器出线直接接到 ATS48 的电机电缆接线端子 2/T1-4/T2-6/T3，ATS48 会因电流不流过内置的互感器而检测不到电流，从而报“缺相”故障，导致不能运行。

(二)

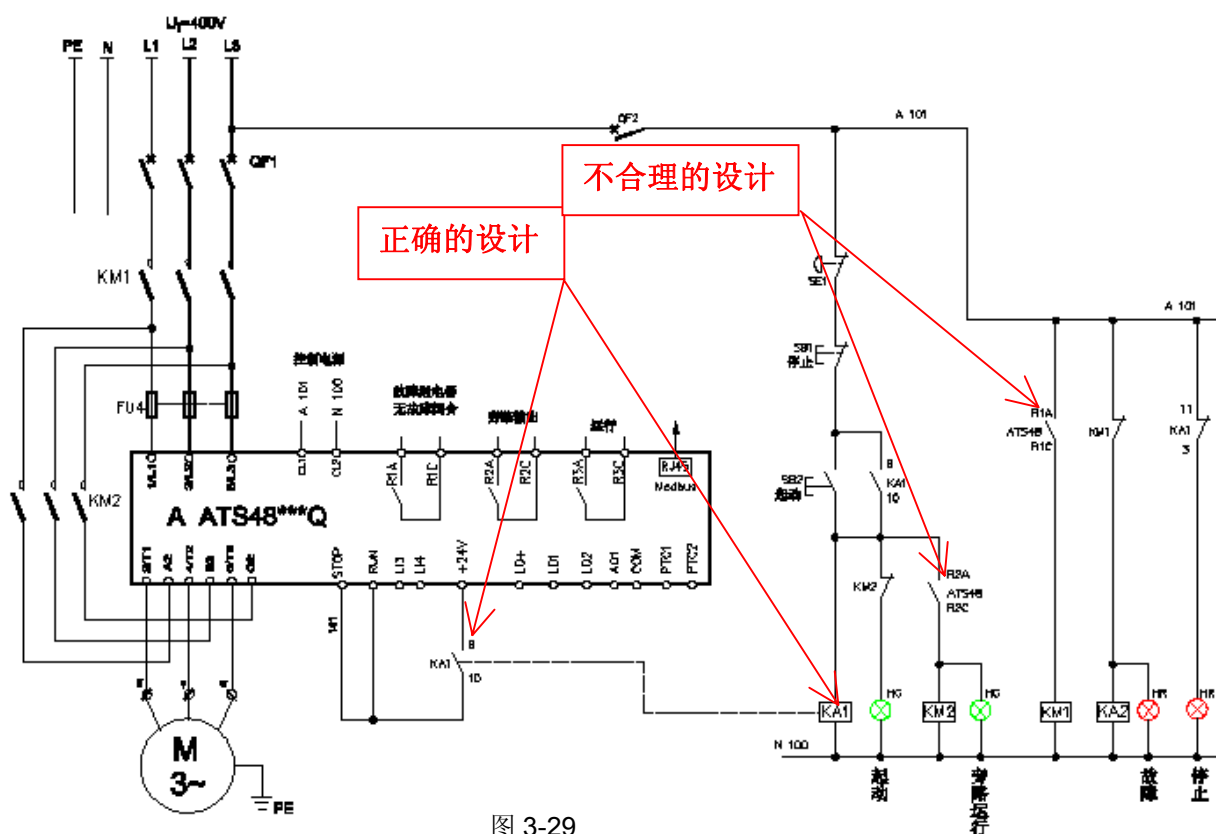


图 3-29

一、图 3-29 中正确的设计：

- 1.用中间继电器 KA1 的触点 5-9 做为运行信号，正常起/停操作不影响进线接触器 KM1；
- 2.进线接触器 KM1 受软起动器的故障触点 R1A-R1C 的控制；
- 3.能得到故障指示和故障信号（KA2 输出）；
- 4.可以实现软起、软停（受控停机）。

二、图 3-29 中不合理的设计：

- 1.用 ATS48 的故障触点 R1A-R1C 直接接通接触器 KM1 的线圈，严重影响 R1 的使用寿命；
- 2.用 ATS48 的旁路触点 R2A-R2C 直接接通旁路接触器 KM2，严重影响 R2 的使用寿命。

三、注意：

ATS48 由于内置了电流互感器，旁路接触器出线必须接在 ATS48 的旁路端子 A2-B2-C2 上，旁路后主回路电流才会流过互感器。

如果旁路接触器出线直接接到 ATS48 的电机电缆接线端子 2/T1-4/T2-6/T3，ATS48 会因主回路电流不流过内置的互感器而检测不到电流，从而报“缺相”故障，导致不能运行。

(三)

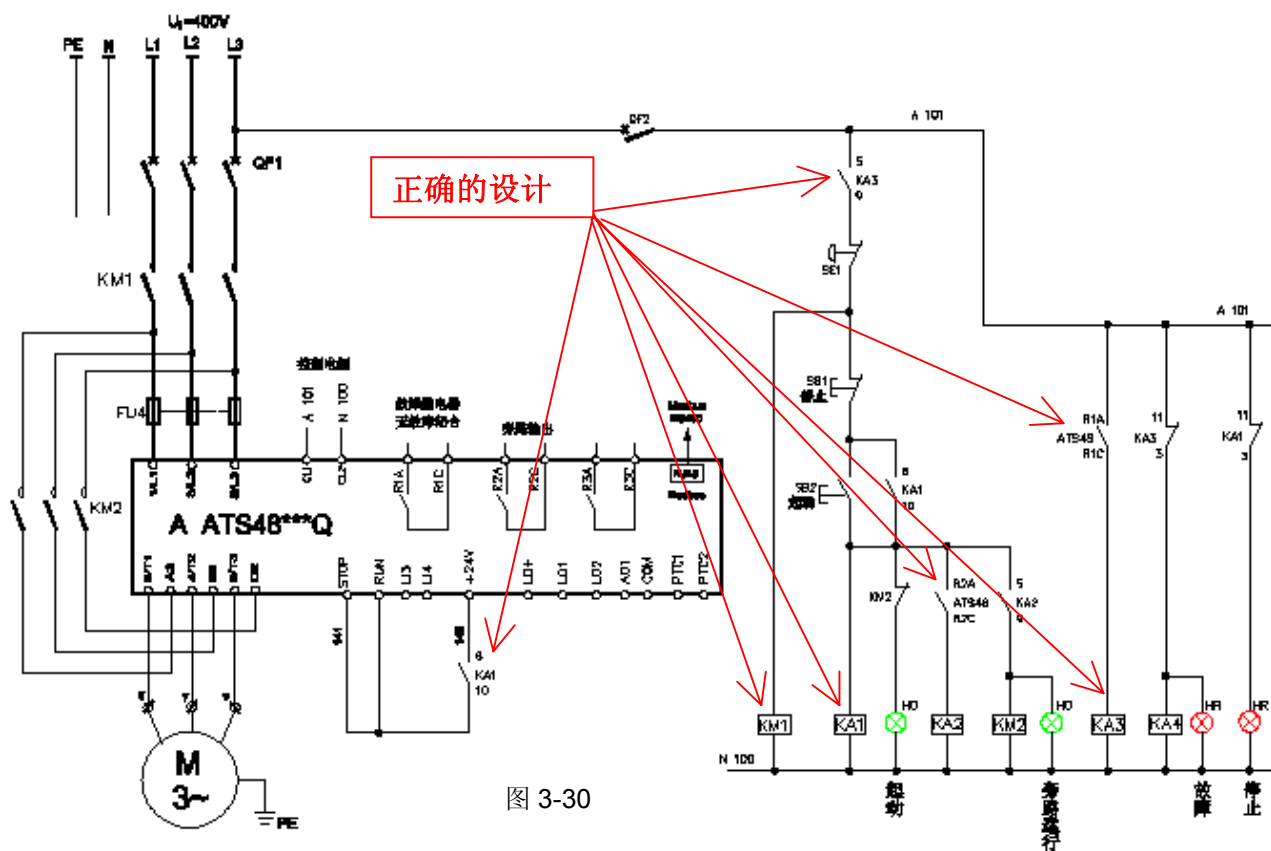


图 3-30

一、图 3-30 中正确的设计：

1. ATS48 的故障触点 R1A-R1C 通过中间继电器 KA3 转接后，用于控制进线接触器 KM1；KA3 的一对常开触点 5-9 接在“急停”回路，出现故障后，KM1 被断开，软起动器主回路失电，同时 KA1 失电，即便按下起动按钮 SB2，也不能使 KM1 和 KA1 线圈得电；
2. ATS48 的运行信号由 KA1 给出，与进线接触器的控制无关；
3. 可输出故障指示和故障信号（KA4）；
4. ATS48 的旁路继电器 R2 通过中间继电器 KA2 转接后控制旁路接触器，可大大延长 R2 的使用寿命。

三、注意：

ATS48 由于内置了电流互感器，旁路接触器出线必须接在 ATS48 的旁路端子 A2-B2-C2 上，旁路后主回路电流才会流过互感器。

如果旁路接触器出线直接接到 ATS48 的电机电缆接线端子 2/T1-4/T2-6/T3，ATS48 会因电流不流过内置的互感器而检测不到电流，从而报“缺相”故障，导致不能运行。

4.变频器、软起动器招标技术规范书注意事项

4.1 变频器招标技术规范书注意事项

在编写变频器招标技术文件时，首先必须对项目准确定位，才能提出对变频器的合理技术要求。一般说来，项目有工业与建筑之分。工业项目中变频器的应用是为满足工业生产需要，工业应用对变频器的性能、功能要求都很高。而建筑应用是指在宾馆、写字楼、办公楼、会议中心等场所中的应用。显然，这些应用都是为了满足人的需求，对变频器的功能要求相对较低，所以建筑应用可以简单地理解为“满足人的需求”的应用。比如施耐德有三个系列的变频器 ATV71、ATV61 和 ATV21。ATV71 和 ATV61 适用于工业领域，而 ATV21 适用于建筑领域。其他公司根据应用领域的不同，也提供了相应的变频器。如果将适用于工业应用的变频器用在建筑领域，势必增加工程造价，造成浪费。反过来，如果将适用于建筑中的变频器用于工业领域，则会因满足不了技术要求而造成无法估量的后果。比如有个设计院，将施耐德的变频器 ATV21 用于石油开采项目中的油泵。等到设备安装了，总包方才发现 ATV21 的功能特性根本满足不了要求，最终只有更换成 ATV61。

其次，工业中的设备多种多样，不同的设备有不同的特性。比如离心风机、离心泵这些简单机械，对速度精度要求不高，过转矩能力要求也不高，应选择适用于工业应用的风机泵类变频器，如施耐德公司的 ATV61。如果选成了用于恒转矩和复杂机械的变频器 ATV71，会增加工程造价。有些设备运行工况非常严酷，或对控制精度的要求非常高，比如石油行业中的磕头机、冶金行业中的冶金吊，造纸行业中的主传动设备等，应选择适用于恒转矩和复杂机械的变频器，如施耐德公司的 ATV71。如果选成了适用于风机、泵的变频器 ATV61，就无法满足技术要求。

再次，如果确定设备需选用变频器，对设备的分类就要注意了：应将设备按照调速特性进行定义，为：风机类负载（或二次方负载），恒转矩类负载，以及恒功率负载。而不要定义为：标准负载和重载。标准负载和重载是按照负载起动的难易程度来划分的，适用于软起动器。比如一台 400KW/3 相 AC380V 的离心风机（假设电机额定电流 $I_n=730A$ ），如果选用变频器驱动，肯定应选风机类变频器，如施耐德公司的 ATV61HC40N4（其最大连续电流为 759A），如果选择驱动恒转矩负载的变频器 ATV71HC40N4 则是不合理的选择（ATV71 价格比 ATV61 高很多）。但如果选用软起

动器来驱动，软起动器的选型肯定应按照 20 级重载应用选择，应选择 **ATS48M10Q**，而不应选择 **ATS48C79Q**。

确定了变频器的档次后，就需对变频器的特性、功能做具体的要求。

(1) 应指明变频器必须满足的标准，比如：“提供的变频器应符合最严格的电气工业控制设备国际标准与建议（IEC，EN），特别是低压，IEC/EN 61800-5-1，IEC/EN 61800-3（传导式和辐射式电磁兼容性（EMC）抗干扰性和电磁散射性）。具备 CE 标志，并通过 UL、CSA、C-Tick、NOM 117 与 GOST 认证”等。

注意，变频器不需要 3C 认证。如果要求变频器提供 3C 认证，则为错误的技术要求。

(2) 应对变频器的特性需求做详细描述：如控制方式，工作电压、所需的 AI/AO/DI/DO 数量，对话工具，通讯类型等。

(3) 应对变频器的各种选件做明确要求：

■ 变频器谐波电流抑制选件

一般可具体要求选配谐波电流抑制选件，如进线电抗器或无源滤波器，也可直接要求变频器输入侧总的谐波电流畸变率，或者二者结合起来。如：“变频器进线侧应配进线电抗器，使得变频器谐波电流总畸变率 $THDI \leq 48\%$ ，以满足 IEC 标准的要求，同时减小电网电压波动对变频器的影响”。或写成：“变频器输入侧应选配无源滤波器，并配合直流电抗器，将谐波电流总畸变率 $THDI$ 抑制到 5% 以下”，或写成：“变频器输入侧应选配恰当的选件，将该回路的谐波电流总畸变率 $THDI$ 抑制到 5% 以下”。最后这种写法实际上要求变频器必须配无源滤波器和直流电抗器。

需要注意的是，无源滤波器+直流电抗器抑制谐波电流的效果虽好，但价格较高，适用于投资宽裕，关注效果的项目。如果确定采用无源滤波器+直流电抗器方案，应将此款列为强制满足，不满足就废标。否则，有的投标人可能会为了中标而选择价格很低的进线电抗器，既造成不公平竞争，又达不到预期设计目的。

■ 变频器输出 dv/dt 抑制选件

变频器输出 dv/dt 抑制选件非常重要，这在前文我们已经做了详细的论述。最简单的要求可以这样写：“投标人应对变频器输出产生的 dv/dt 有充分的认识，并根据投标所采用的变频器的技术资料和本项目中机电电缆的长度、类型，采取相应的方案抑制 dv/dt ”。但如果这样要求，有的投标人为了中标，即便对于比较长的机电电缆（如长达

70 米），仍不选配 dv/dt 抑制选件，其整体价格可能会低很多，造成不公平竞争。为此，建议做明确、具体的要求：“为抑制 dv/dt ，使电机免受变频器输出产生的过电压击穿而损坏，电机电缆超过 50 米，必须选配电机电抗器；超过 300 米，必须选配正弦滤波器。具体选配时，投标人应根据投标所采用的变频器的技术资料和本项目中电机电缆的类型、实际长度决定”。建议将该技术要求列为强制条款，不满足就直接废标，以确保公平竞争。

需要注意的是，如果采用正弦滤波器，电机电缆不能选用屏蔽电缆或铠装电缆，因正弦滤波器与屏蔽（或铠装）电缆不兼容，而且变频器只能采用 V/F 控制模式。

■ EMC 滤波器

变频器 EMC 滤波器的作用非常重要，我们在前文做了详细讨论。为了满足设计规范，变频器招标技术文件必须要求变频器带 EMC 滤波器。标书中可这样要求：“为减小变频器运行中产生的辐射与传导干扰，满足 EMC 抗扰性的要求，变频器必须集成 A 类 EMC 滤波器，以满足 IEC 关于电磁兼容的相关规范”。对于距离敏感设备或检测元件较近的变频器，还应要求变频器另外选配附加的 EMC 滤波器。完整的表述要求可以这样写：“为减小变频器运行中产生的辐射与传导干扰，满足 EMC 抗扰性，变频器必须集成 A 类 EMC 滤波器，以满足 IEC 关于电磁兼容的相关规范。用于驱动编号为****设备的变频器，由于距离****等重要设备（或检测元件）较近，这些变频器必须安装附加的 EMC 滤波器。具体选型时应参考投标所采用的变频器的技术资料”。

招标人应将“****”号中的内容根据实际情况补充完整。

■ 制动能量释放选件

变频器能量制动释放选件的作用非常重要，必须根据变频器应用的具体技术条件做明确选择。对于泵类负载，由于需要软停机，任意时刻能量都是从变频器传递到电机，所以绝对不需要选配任何制动选件。对于风机、传送带等设备，如果需要制动停机，根据制动能力的大小，确定是否需选配制动单元和制动电阻。详情可参见《2.1.5 制动能量释放选件》。如果不做区分而清一色要求变频器都选配制动单元和制动电阻，以实现停机时能耗制动，是非常错误的做法。如果设备确实需要制动停机，可要求变频器选配制动能量释放选件，标书中可这样要求：“编号为****的风机（或传送带），采用制动停机方式，停机时间不长于***秒，变频器应选配相应的制动单元和制动电阻。具体选型应参考投标所采用的变频器的技术资料”。

需要再次强调的是，以上变频器的各种选件：谐波电流抑制选件、**dv/dt** 抑制选件、**EMC** 滤波器、制动能量释放选件之间没有任何关系。有很多初学者，总是问：“变频器集成了 **EMC** 滤波器，可不可以不要进线电抗器”，或问：“变频器集成了 **EMC** 滤波器，可不可以不要电机电抗器”，或问：“用了进线电抗器，可不可以不要电机电抗器”，所有这些问题，都是源于对变频器的原理、结构和选件功能缺乏必要认识造成的。通过前面章节的讨论，所有这些问题都应得到完美解答了。

（4）对变频器的保护功能做相应要求

一般说来，变频器提供的保护非常完善。标书中可以这样要求：“变频器应提供完善的保护，如：输入过压、直流母线过压、输入欠压、输入缺相、过载、欠载、变频器过热、电流限幅、转矩限幅、输出缺相保护，提供 **IGBT** 测试功能，以测试变频器输出回路的短路或断路故障”。

这里要特别注意一种保护：“短路保护”，变频器是不可能提供短路保护的，也就是，变频器在运行过程中，如果发生短路，必然被烧毁。有很多技术人员想当然认为变频器可以提供短路保护，这是以讹传讹的结果。

我们只需要将变频器和软起动器的过流参数对比一下，就能明白变频器为什么不可能提供短路保护。以施耐德的变频器 **ATV61** 为例，其过流能力为变频器额定电流的 **130%**，最长持续时间 **60** 秒。这种过流能力怎么可能承受短路电流的冲击？再来看软起动器，以 **ATS48** 为例，在冷状态下，重载应用场合的脱扣时间为：**4In/48s**（**In** 为软起动器的额定电流）。这么强的过流能力，软起动器的技术文件中都并未宣称“软起动器能提供短路保护”而是说“软起动器能提供堵转保护”，以变频器 **1.3In/60s** 的过流能力，怎么可能提供短路保护？

如果变频器不能提供短路保护，如有短路故障，变频器是不是一定被烧毁呢？答案是：不一定。为什么呢？因为变频器提供了 **IGBT** 测试功能。该功能可以使得变频器在接到运行命令后，对每个 **IGBT** 进行测试：在输出回路中施加一定的电压，通过检测回路中的电流，以检测变频器——电机回路中存在的短路或断路。如果回路中存在短路或断路，变频器报错并锁定。注意，此过程中，该回路中没有大短路电流。这是因为，变频器为测试回路状态而输出的电压很小，从而电流也很小。

通过上述分析，很显然，变频器可提供“单相接地故障保护”，即“输出缺相保护”的一种。

适用于工业领域中离心风机、离心泵的变频器招标技术规范书可参考《8 附录》中的附录 1，适用于建筑领域的变频器招标技术规范书可参考《8 附录》中的附录 2。

4.2 软起动器招标技术规范书注意事项

相对变频器而言，软起动器简单得多。软起动器招标技术规范书常见错误与变频器的一样，源于对软起动器基本原理和结构缺乏认识。

在编写软起动器招标技术规范书时，首先应要求软起动器满足相关标准，如：“软起动器的生产商应具有成熟的软起动器、变频器生产经验和悠久的历史，提供的软起动器应符合国际标准，特别是起动器产品标准 **EN/IEC 60947-4-2**，具备 **CE** 标志，并通过 **UL、CSA、DNV 及 CCC** 认证”。

其次，需要对软起动器的特性、功能做详细的要求。如：I/O 点、工作电压、控制电压、控制技术等。

在要求软起动器的保护功能时，可以这样描述：“要求软起动器提供过流、过载、缺相、欠载、堵转等保护，即便旁路运行，这些保护仍然维持。要求软起动器提供相序保护，以防水泵反转。”

若要求软起动器进一步提高安全性和可靠性，可以这样要求：“软起动器应另配进线接触器，该接触器受软起动器故障断点控制。在故障时受控断开，以保护设备和线路。但软起动器的正常起/停严禁控制此接触器”。

为了确保软起动器的使用寿命，可以这样要求：“软起动器必须另配旁路接触器，该接触器受软起动器旁路触点控制，软起动器起动完毕，该接触器受控闭合，软起动器工作在旁路状态。但软起动器旁路运行时，提供的过流、过载、缺相、欠载等电子保护必须维持，而不需要另加热继电器。为延长软起动器旁路继电器的使用寿命，应通过中间继电器转接后带动旁路接触器线圈。”

通过前面章节的讨论，我们知道软起动器的选件很少。但有的软起动器招标技术规范书却别出心裁，要求软起动选配制动单元。通过前面章节的讨论，我们已经清楚，这个错误的根源，在于对软起动器的原理和电路结构缺乏最基本的认识。

如果风机、传送带等设备需要制动停机，在软起动器招标技术可以这样要求：“用于驱动编号为***的风机的软起动器应采用制动停机方式，停机时间不长于***秒”。“用于驱动编号为***的传送带的软起动器应采用制动停机方式，停机时间不长于***秒”

而绝对不能写作：“软起动器应选配制动单元”。

软起动器的招标技术规范书可参考《8 附录》中的附录 3。

5 施耐德电气变频器、软起动器、 电机管理控制器典型应用一次、二次图

5.1 施耐德电气变频器 ATV61 典型应用一次、二次图

5.2 施耐德电气变频器 ATV21 典型应用一次、二次图

5.3 施耐德电气变频器 ATV71 典型应用一次、二次图

5.4 施耐德电气软起动器 ATS48 典型应用一次、二次图

5.5.1 施耐德电气电机管理控制器 Tesys T 典型应用一次、二次图

5.5.2 施耐德电气电机起动控制器 Tesys U 典型应用一次、二次图

6 施耐德电气变频器、软起动器特殊应用方案

6.1 15KW 离心风机 ATV61 变频控制电气原理图（带消防备用电路）

6.2 15KW 离心风机、或离心泵 ATV21 变频控制电气原理图（带备用电路）

6.3 18.5KW 风机正反转 ATV61 变频控制电气原理图

6.4 160KW 风机正反转 ATS48 软起动控制电气原理图

6.5 双速风机 ATS48 软起动器控制电气原理图

6.6 3×55KW 消火栓消防泵两用一备 ATS48 软起动控制电气原理图

6.7 3×11KW 自动喷淋消防泵两用一备 ATS48 软起动控制电气原理图

7.变频器、软起动器工程应用方案

7.1 恒压供水变频器、软起动器 **PLC** 控制系统方案

7.2 水处理变频器、软起动器 **PLC** 控制系统方案

7.3 **2×479KW** 螺杆水冷冷水机组冷站 **DDC** 控制原理图

8. 附录

附录 1 变频器招标技术规范书（适用于工业离心风机、离心泵）

特别说明：本技术规范书中凡标有*号的内容，均为强制性条款，含有“必须”字样描述的需求，也是强制性条款。对强制性条款的负偏差将导致废标。

凡上一级条目带*号，则表示该条目向下的所有条目均为带*号内容，如 1.1 条带*号，则表示 1.1 条向下的 1.1.1、1.1.2 等所有条目均为带*号内容。

投标人对招标技术文件必须逐条作出实质性的应答，并对涉及的技术参数、报告等，必须提供相关书面证据作为佐证。

1. 概述

本批变频器招标为 _____ 配套。变频器的生产商应为欧美著名品牌，应具有成熟的变频器、软起动器生产经验和悠久的生产历史，提供的变频器应符合最严格的电气工业控制设备国际标准与建议（IEC，EN），特别是低压，IEC/EN 61800-5-1，IEC/EN 61800-3（传导式和辐射式电磁兼容性（EMC）抗干扰性和电磁散射性）。具备 CE 标志，并通过 UL、CSA、C-Tick、NOM 117 与 GOST 认证。为便于选型和调试，离心风机、离心泵等变转矩负载采用同一系列的风机类变频器。

*2 本项目中的所有变频器与软起动器必须为同一品牌产品。

*3 本次招标变频器所配电机额定电压为三相 AC380V@50Hz。

4 电机功率、额定电流、所带负载配套设备参见招标图。

5 现场环境条件：

工作温度范围：-10~+55℃，50~55℃允许降容使用；

储藏温度范围：-25~+60℃；

相对湿度：10~90%，不凝露；

海拔高度：小于 1000 m 不降容；

为确保变频器可靠、稳定运行，变频器必须按以上最不利环境合理选型，且要求留有合理余量。

6 变频器最高环境污染等级应符合 IEC/EN 61800-5-1。

7.为方便今后设备使用、维护和管理，变频器必须为国际著名电气公司近年推出具有多种先进控制方式的变频器。要求变频器具有：无传感器磁通矢量控制（FVC）、电压/频率比（2点或5点）、能量节省比等3种控制方式。

8 考虑到电网电压波动较大，变频器的供电电压范围应允许在 $380-15\% \sim 480V+10\%$ 间。并要求变频器连续运行时，欠压水平可达 50%。

9 变频器过转矩能力：为满足电机快速起动或负载波动需要，在第 5 条中规定的最高温度条件下，要求变频器过转矩能力达到 130%，持续 1 分钟。

10 为抑制变频器向电网注入的谐波电流，同时减小电网浪涌电压对变频器的冲击，改善三相电压不平衡对变频器的影响，变频器应配进线电抗器。

（*10.为将变频器产生的谐波电流总畸变率 THDI 抑制到 5%以下，以将谐波电流产生的危害降到最小，要求变频器选配无源滤波器和直流电抗器。注意：如果采用此方案，则会增加变频器的投资，请招标人确认投资是否允许。如果采用了此技术条款，需将上一个第“10”的内容删除，而保留这条，并列为强制条款以保公平竞争。）

*11 为减小变频器运行中产生的辐射与传导干扰，满足 EMC 抗扰性，变频器必须集成 A 类 EMC 滤波器。并有集成 B 类 EMC 滤波器的产品系列和附加的 EMC 滤波器可选。

*12 为抑制变频器输出产生的 dv/dt ，避免因电机电缆过长而产生大的过电压损害电机的绝缘，要求变频器能提供电机电抗器和正弦滤波器两种 dv/dt 抑制附件，以满足不同长度的电机电缆的需要。电机电缆超过 50 米，必须选配电机电抗器；超过 300 米，必须选配正弦滤波器。具体选配时，投标人应根据投标所采用的变频器的技术资料和本项目中电机电缆的实际长度、类型确定。

13 要求变频器动力电缆采用下进线、下出线接线方式。

14 为满足现场恶劣污染环境的要求，变频器应为增强型，其面板和控制板具有防护涂层，或具有增强型可选版本。

15 变频器功能要求

*15.1 要求通过宏配置和“简单启动”菜单，使变频器能够迅速地建立起应用，通过用户友好的对话工具可以毫不费时地进行参数调整。

15.2 要求变频器具有为泵类和通风应用专门设计的功能：

要求具有节能比，2 点或 5 点 V/F 曲线控制方式；

要求具有速度检测的自动捕捉旋转负载功能；

要求根据不同的转速电流限幅自适应；

要求能通过调整开关频率（根据功率规格的不同，可以高达 **16KHz**），以有效地抑制电磁噪声和谐振。要求开关频率的调整可以在运行中调整；

要求具有多段预置速功能；

要求内置 **PID** 调节器，具有预置 **PID** 给定以及手动/自动模式；

要求具有流体缺失检测，零流速检测，流速限制等功能；

要求具有休眠功能和唤醒功能；

要求具有电能计数和运行时间计数功能。

***15.3 要求变频器具有完善的保护功能，包括但不限于：**

要求对电机和自身的热保护，具有电机 **PTC** 热探头管理功能；

要求连续运行过程中提供过载和过流保护；

要求能通过调频，避免共振，以提供对机械的保护；

要求能通过欠载，过载和零流速检测，实现对设备的保护；

要求提供输入过压、直流母线过压、输入欠压、输入缺相、电流限幅、转矩限幅、输出缺相保护；

要求提供 **IGBT** 测试功能，以测试变频器输出回路的短路或断路故障；

要求能通过多种层次的故障管理和可配置的报警分组，以实现相应保护。

15.4 要求变频器具有安全功能：

要求变频器具有通过集成的“**Power Removal**”功能保证机械安全，以禁止电机意外启动；要求该功能满足机器安全标准 **EN954-1** 类别 **3** 和运行安全标准 **IEC/EN61508,SIL2**(应用于过程和系统的安全控制/信号)；

要求变频器具有可通过禁止故障、转向控制和配置给定方式等进行强制操作的功能，以保障设备的安全。

15.4 要求变频器具有高度灵活性和用户友好性：

考虑到现场使用、维护的方便，每台变频器必须配有独立中文操作显示面板。该面板图形屏幕可显示不低于 **5** 行、每行 **20** 个字符的纯文本。可通过导航按钮，快速地访问或修改变频器的各种参数。可监视变频器状态、电机电流、电机电压、电机转速、输出频率、速度给定、电机转矩和运行过程量。*提供的语言包括中文、英文在内，不低于 **5** 种，并可根据用户的需要，装入其它语言。*必须能提供相关附件，以便于将该中文操作显示面板安装到机柜门板上，并能获得高达 **IP65** 防护等级。

要求变频器具有大量的可配置的逻辑和模拟输入与输出，用来优化和方便应用。变频器必须至少具有 6 个逻辑输入、2 路继电器输出、2 路模拟输入、1 路模拟输出、1 路安全输入。变频器必须具有 I/O 扩展能力。

为方便与自动化系统连接，变频器应配有 Modbus 和 Canopen 两种通讯协议，通讯接口为 RJ45 终端口。为便于甲方选择和系统集成，变频器还应具有以下工业通信卡和楼宇总线通讯卡可供选择：FIPIO、Modbus TCP、Modbus Plus、Modbus/Uni-Telway、Profibus DP、Device Net、Ethernet/IP、InterBus，LonWorks、BACnet NetaSYS N2 和 APOGEE FLN。

附录 2 变频器招标技术规范书（适用于建筑离心风机、离心泵）

特别说明：本技术规范书中凡标有*号的内容，均为强制性条款，含有“必须”字样描述的需求，也是强制性条款。对强制性条款的负偏差将导致废标。

凡上一级条目带*号，则表示该条目向下的所有条目均为带*号内容，如 1.1 条带*号，则表示 1.1 条向下的 1.1.1、1.1.2 等所有条目均为带*号内容。

投标人对招标技术文件必须逐条作出实质性的应答，并对涉及的技术参数、报告等，必须提供相关书面证据作为佐证。

变频器技术规范书

1 概述

变频器生产商应为欧美知名公司，应具有成熟的变频器、软起动器生产经验和悠久的历史，提供的变频器应符合最严格的电气工业控制设备国际标准与建议（IEC，EN），特别是低压，IEC/EN 61800-5-1，IEC/EN 61800-3（传导式和辐射式电磁兼容性（EMC）抗干扰性和电磁散射性）。具备 CE 标志，并通过 UL、CSA、C-Tick、NOM 117 与 GOST 认证。

2 环境

2.1 变频器的贮存温度为-25~+70℃，运行环境温度为-10~50℃，40℃以上允许降容使用。允许最大相对湿度为 95%，无凝露。

2.2 最高环境污染等级应符合 IEC/EN 61800-5-1。

2.3 海拔 1000 米以内不降容，1000 米以上每增加 100 米允许额定电流降容 1%。

*3 本次招标变频器所配电机额定电压为 3 相 AC380V@50Hz。

4 电气控制与保护特性

4.1 要求变频器的控制方式要求具有：无传感器磁通矢量控制、电压/频率比、节能比等 3 种方式。

4.2 要求变频器输出频率范围为 0.5~200HZ。

4.3. 要求变频器瞬时过转矩能力不低于额定转矩的 120%，持续时间不低于 60s。

4.2 要求变频器内置 Modbus，并能提供 LonWorks，NetaSYS N2，APOGEE FLN，BACnet 等全部主流楼宇总线通讯卡，以便于用户选择和系统集成。

- *3.4.变频器必须采用必要的谐波抑制方案，将其输入侧产生的谐波电流总畸变率（THDI）减小至小于35%，优于IEC标准 $THDI \leq 48\%$ 的要求。
- *4. 为减小变频器运行中产生的辐射与传导干扰，满足EMC抗扰性，变频器必须集成A类EMC滤波器。
- *5. 要求提供输入过压、直流母线过压、输入欠压、输入缺相、过载、欠载、电流限幅、输出缺相保护；要求提供 IGBT 测试功能，以测试变频器输出回路的短路或断路故障；
- *6. 为便于操作和节省成本，全系列必须集成7段显示面板。
- *7. 要求供货商或生产商必须提供统一的售后服务，并在保修期内提供现场服务。

附录 3 软起动器招标技术规范书

特别说明：本技术规范书中凡标有*号的内容，均为强制性条款，含有“必须”字样描述的需求，也是强制性条款。对强制性条款的负偏差将导致废标。

凡上一级条目带*号，则表示该条目向下的所有条目均为带*号内容，如 1.1 条带*号，则表示 1.1 条向下的 1.1.1、1.1.2 等所有条目均为带*号内容。

投标人对招标技术文件必须逐条作出实质性的应答，并对涉及的技术参数、报告等，必须提供相关书面证据作为佐证。

软起动器招标技术规范书

1 概述

本批软起动器招标是为_____工程配套。软起动器生产商应为欧美知名公司，应具有成熟的软起动器、变频器生产经验和悠久的历史，提供的软起动器应符合国际标准，特别是起动器产品标准 EN/IEC 60947-4-2，具备 CE 标志，并通过 UL、CSA 及 CCC 认证。为便于选型和调试，各种规格必须采用同一系列。

2 环境

2.1 软起动器的贮存温度为-25~+70℃，运行环境温度为-10~60℃，40℃以上允许降容使用。允许最大相对湿度为 95%，无凝露。

2.2 最高环境污染等级应符合 IEC/EN 60664-1。

2.3 海拔 1000 米以内不降容，1000 米以上每增加 100 米允许额定电流降容 2.5%。

*4 本次招标软起动器所配电机额定电压为 3 相 AC380V@50Hz。

3 电气控制与保护特性

*3.1 软起动器必须为转矩控制型，即以输出转矩作为控制变量，能设定初始转矩和转矩积分时间，结合电流限幅，在起动和软停过程中可根据负载类型提供线性变化的转矩，以期达到最平滑的起动或停止曲线。

*3.2 软起动器应能对电机提供过流、过载、缺相、欠载、堵转、预加热等保护，必须能根据电机额定电流和电路中的实际电流持续计算电机的温升，以提供对电机精确的热保护。为防止电机在温升过高的情况下重新被起动，要求即便在停机或软起动器已被断

电、甚至软起动器控制电路断开的情况下，软起动器仍然能计算热状态。软起动器必须具有 PTC 传感器输入口，对电机局部温度过热提供保护。

3.4 软起动器应能对软起动器提供过热、起动时间过长、连续起动间隔等保护；软起动器应自带冷却风扇；为了提高风扇的使用寿命，风扇的起停应由软起动器的内部温度控制。

3.5 软起动器主电路应另配进线接触器，该接触器受软起动器故障触点控制。在软起动器检测到故障时断开此接触器，形成一个可靠的物理断点，以保护电机和线路设备。

*3.6 起动过程结束后，软起动器必须能够自动提供旁路信号给旁路接触器，旁路后，电子保护功能，如电机过载保护，过流保护，欠载保护，缺相保护、堵转保护等必须保持有效。电路设计时，软起动器的旁路继电器应通过中间继电器转接后带动旁路接触器线圈，以延长软起动器旁路触点的使用寿命。

4 接口、界面和通讯

4.1 软起动器必须提供足够的可编程的输入输出口，以便实现远程控制：应配置至少 3 个继电器输出、应配置除起停控制外至少 2 个逻辑输入端子；应配置至少 1 个模拟输出。

4.2 软起动器应具备 LCD 或 LED 编程与显示界面，还应提供远程界面以便在电控柜外编程和显示，所有的参数调整必须能够在界面上实现，不接受电位计或跳线形式的参数调整；软起动器的界面应能显示输出电流、功率因数、电机力矩、有功功率等参数。

4.3 软起动器应内置 RS485 接口，并驻留 Modbus 协议，通过通讯模块，能至少与 3 种以上的总线及工业以太网进行通讯。

5 故障处理

5.1 软起动器检测到本身或电机及其负载的故障后，应能够显示相应的故障代码，并将其存储备查。

5.2 必须能够区分可复位故障和不可复位故障，作不同方式处理。

附录 4 负载分类

如果选用变频器，负载的分类应根据负载转矩与转速的关系来划分，亦即根据负载的调速特性来划分，分为风机类负载（亦称二次方负载，即负载转矩与转速二次方成正比）、恒转矩负载和恒功率负载。选用变频器驱动负载，不能将负载说成“重载”和“轻载”。

离心风机、离心泵是典型的风机类负载，如果选用变频器，应选用风机类变频器，如施耐德电气的变频器 ATV21 或 ATV61。如果选用恒转矩类变频器，则会造成不必要浪费。

搅拌机、研磨机、传送带、起重机械等属于恒转矩负载，这些负载应选用恒转矩类变频器，如施耐德电气的变频器 ATV71。如果选用风机类变频器，则容易被烧毁，或者根本满足不了技术要求而不能用。

绕线机、卷板机等卷绕设备是典型的恒功率负载，应选用可调节磁通的变频器，以通过调节磁通来实现恒功率调速，如施耐德电气的变频器 ATV71。

各种负载的转矩与转速的函数关系见图 8-1、8-2 和 8-3。

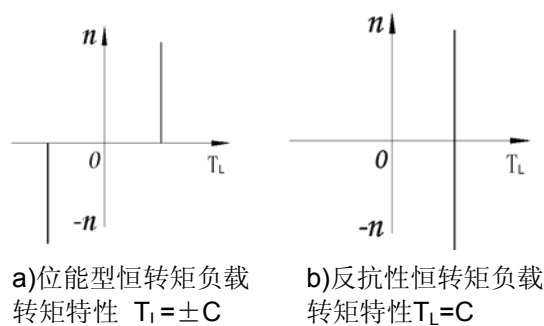


图 8-1 恒转矩负载转矩特性

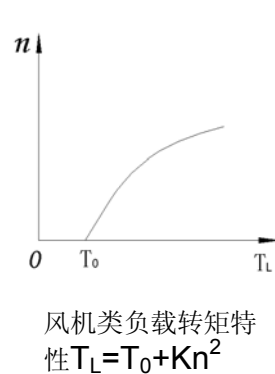


图 8-2 风机类负载转矩特性

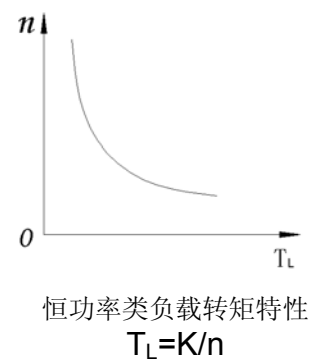


图 8-3 恒功率类负载转矩特性

常见负载转矩特性及选用变频器见表 8-1。

序号	设备名称	负载类型	所选用变频器型号
1	离心泵	风机类负载	ATV61 或 ATV21
2	离心风机	风机类负载	ATV61 或 ATV21
3	离心式压缩机	风机类负载	ATV61 或 ATV21
4	活塞泵	恒转矩负载	ATV71
5	罗茨风机	恒转矩负载	ATV71
6	螺杆机	恒转矩负载	ATV71
7	提升机	恒转矩负载、复杂机械	ATV71
8	牵引机	恒转矩负载、复杂机械	ATV71
9	传送带	恒转矩负载、复杂机械	ATV71
10	平移运输机械	恒转矩负载、复杂机械	ATV71
11	搅拌机	恒转矩负载	ATV71
12	研磨机	恒转矩负载	ATV71
13	振动机	恒转矩负载	ATV71
14	破碎机	恒转矩负载	ATV71
15	绕线机	恒功率负载	ATV71
16	卷板机	恒功率负载	ATV71

表 8-1 常见负载转矩特性及选用变频器

如果选用软起动器，负载的分类应根据负载起动的难易程度来划分，分为标准负载和重型负载（重载）。

注意“空载起动”这一说法，是指在起动过程中不带负载，起动完成后带载运行。比如，属于标准负载的离心水泵，进水管如果安装有调节阀，起动前将此阀门关闭，起动完毕后将此阀门缓慢打开至全开，这个过程就是“空载起动”。再比属于恒转矩负载的搅

拌机，起动前，机器内没有物料，起动完后，再向机器内缓慢添加物料，这个过程也是“空载起动”。所以“空载起动”是指起动过程，与负载是标准负载还是重载无关。

常见负载类型及软起动器选型见表 8-2。

序号	设备名称	负载类型	所选用软起动器型号	软起动器选型依据
1	离心泵	标准负载	ATS48	10 级标准应用
2	离心式压缩机	标准负载	ATS48	10 级标准应用
3	75KW 及以下离心风机	标准负载	ATS48	10 级标准应用
4	90KW 及以上离心风机	重型负载	ATS48	20 级重载应用
5	活塞泵	重型负载	ATS48	20 级重载应用
6	罗茨风机	重型负载	ATS48	20 级重载应用
7	螺杆机	重型负载	ATS48	20 级重载应用
8	提升机	重型负载	ATS48	20 级重载应用
9	牵引机	重型负载	ATS48	20 级重载应用
10	传送带	重型负载	ATS48	20 级重载应用
11	平移运输机械	重型负载	ATS48	20 级重载应用
12	搅拌机	重型负载	ATS48	20 级重载应用
13	研磨机	重型负载	ATS48	20 级重载应用
14	振动机	重型负载	ATS48	20 级重载应用
15	破碎机	重型负载	ATS48	20 级重载应用

表 8-2 常见负载类型及软起动器选型

附录 5 思考题参考答案

思考题 1：变频器在待机状态下，是否会产生谐波电流？为什么？软起动器在待机状态下，是否会产生谐波电流，为什么？

答：变频器在待机状态下会产生谐波电流。这是因为，变频器处于待机状态时，线路电源仍会对变频器内部储能稳压电容充电。电容正负极板之间存在漏电流，所以电容正负极板之间的电压会降低。当电容两端的当前电压小于此时的线路电压时，线路电源就会对变频器充电，此时变频器与电网之间就有谐波电流，参见图 8-4a。

而软起动器在待机时，内部晶闸管处于截止状态，所以不会有电流流过，也就没有谐波电流流入电网，参见图 8-4b。

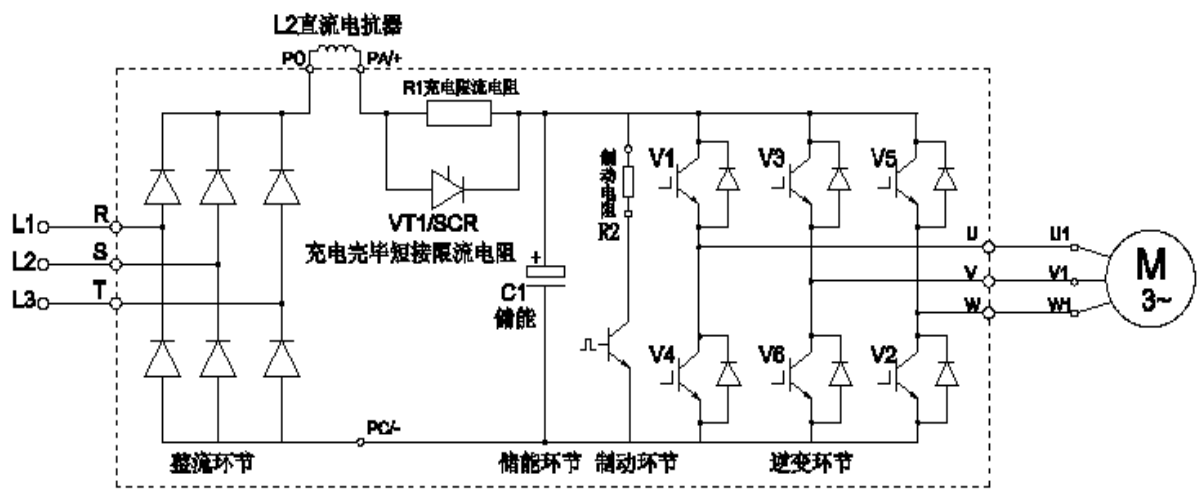


图 8-4a 交-直-交型变频器的主回路原理图

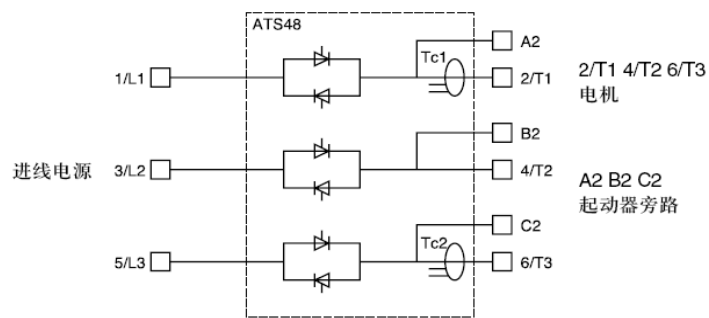


图 8-4b 软起动器（ATS48）主回路原理图

思考题 2. 变频器供电的空气开关的脱扣器能否选择用于配电的热磁型脱扣器，为什么？

答：变频器供电的空气开关的脱扣器不能选用用于配电的热磁型脱扣器。这是因为，变频器主回路刚得电时，电容相当于短路，回路中只有一个限流电阻（有可能还有一个直流电抗器），故回路中会有比较大的冲击电流，此电流一般为额定值的 3 倍左右。如果选用热磁型脱扣器的开关供电，容易脱扣。

另外需要注意，变频器如果集成了 EMC 滤波器，其供电的空气开关不能选用漏电型开关。EMC 滤波器的漏电流可参考所选用的变频器技术资料。如施耐德《ATV61 产品目录》第 162 页列出了附加的 EMC 滤波器的对地泄漏电流。

思考题 3. 为什么说软起动器的原理和主电路结构决定了其不可能加制动单元和制动电阻器这样的选件？

答：软起动器的原理是“削波降压”，其主电路结构是 6 个反并联晶闸管或 3 个双向晶闸管。当对大惯量机器进行制动停机时，通过控制晶闸管的导通，对电机定子绕组施加一个直流电压，根据右手定则，可以判断出此时电机转子线圈中感生电流的方向，再根据左手定则，可知此时转子的在定子磁场中的受力方向与转子旋转方向相反，也就是此时的电磁转矩为制动转矩，使得电机快速停机。由此可见软起动器制动停机不需要制动单元和制动电阻。软起动器主回路原理参见图 8-5。

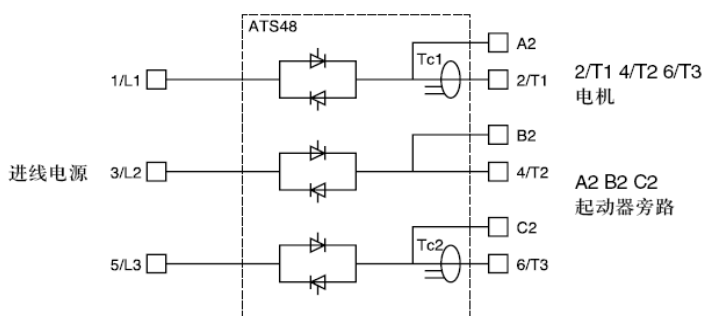


图 8-5 软起动器（ATS48）主回路原理图

思考题 4：软起动器输出是否需要加装电机电抗器或正弦滤波器这样的输出选件？

答：输出选件的作用是抑制 dv/dt 。软起动器的基本原理是“削波降压”。软起动器启动过程中输出电压是有缺口的正弦波，启动完成后输出的是完整的正弦波电压。所以软起动器在启动和运行过程中，输出电压对时间的微分 dv/dt 是余弦，不会产生过电压，也就不需要加装电机电抗器或正弦滤波器这样的输出选件。

思考题：5. 有这样一个真实的工程案例：变压器容量 $S_e=500\text{kVA}$ ，向一台水泵供电，水泵功率 $P_e=75\text{KW}$ 。水泵为单泵，进、出口水管没有安装阀门。后来项目改造，水泵功率增大为 $P_e=220\text{KW}$ 。

设计师开初选用了软起动器，您认为设计选用软起动器是否合理？

结果想了一切可想的办法，都未起动成功。后来换成变频器，便毫无悬念地起动成功。为什么？

答：在本案例中，选用软起动器是不可能起动成功的。如果水泵进水管安装有调节阀，可以先将阀门关小，留有一点缝隙，然后起动软起动器，此时相当于空载起动。起动过程结束后，再缓慢打开阀门至全开。但本案中，水泵进水管没有安装调节阀，所以不可能起动成功。原因在于软起动器是一种降压起动装置，在降压起动的同时，起动转矩也会减小，同时起动电流比较大，回路压降很大。起动过程中，电机转速升不上去，起动电流就不能减小，回路压降就很大，电机端电压就很小。如果电机端起动电压小于 220V ，则起动不了水泵。一般说来，变压器剩余容量为电机功率的 4 倍，采用软起动器就可以保证起动成功。选用软起动器时，变频器剩余容量的最小值不能低于电机功率的 3 倍，否则起动不了。

如果换用变频器，变频器起动频率一般是 0Hz ，此时变频器输出电压非常小，回路中的电流就非常小，但起动转矩一般大于 0.5 倍额定转矩。起动过程中，变频器输出频率逐渐增大，变频器输出电压和回路中电流也逐渐增大，电机的转速也随着增大。当变频器输出达到 50Hz 时，电机转速达到额定转速，起动过程完毕，电机进入稳态运行。

从电机拖动的角度来看，采用软起动器时，由于起动电压较高（电机相电压一般不低于 220V ），而电压频率不变，为 50Hz 。在通电的瞬间，电机转子转速为 0，尚未建立起反电势。定子回路只有线路电抗和电机定子电抗串联，该值很小，所以起动电流很大。当转子旋转起来后，就会产生反电势削弱定子电势，能量就由定子传递到了转子。如果起动过程中，定子电势增大的速度大于转子产生的反电势的增大速度，起动电流就会持续增大。当定子电势增大到等于线路电压就不再增大，而此时转子产生的反电势随着转速的增大而不断增大，这样起动电流就会逐渐减小。当转子达到额定转速时，转子产生的反电势增大到最大，起动过程结束，电机进入稳态运行。

注意此过程中能量的传递。定子电势与转子电势差越大，起动电流就越大。定子电势与转子电势差越小，起动电流就越小。而后者就是变频器的起动过程。

变频器启动时，由于启动频率为 0Hz，故输出电压很小（可认为该电压值不超过 30V），定子回路的电抗值为线路电抗和电机定子电抗串联之和，该值虽然很小，但电压也很小，故此时回路中的电流非常小，而启动转矩较大，一般大于 0.5 倍额定转矩。故电机很容易被启动。随着变频器输出频率的增加，输出电压也逐渐增加，转子转速逐渐增大，产生的反电势削弱了电机定子电势，这样能量就由定子传递到了转子。当变频器输出到 50Hz，电机转速也达到额定转速，电流也逐渐增大到额定值。

根据上述分析，我们很容易知道，如果变频器启动时间设置过短，启动过程就会报“过流故障”。原因很简单，变频器启动时间设置过短，输出频率很快达到额定值，输出电压就会很快增大到变频器母线电压，而此时电机转子转速较低，产生的反电势较小，定子与转子之间的电势差很大，所以回路中电流会很大。因此变频器的启动时间一定要与负载的转动惯量相匹配，并适当延长。同理，如果变频器启动频率设置过高，变频器也会报“过流故障”；如果软停时间或制动停机时间设置过短，变频器会报“过压故障”。

电机能量的传递，如果从定子传递到转子，电机就运行在“拖动”状态，定子和转子的电势差越大，启动过程冲击就越大，启动电流就越大，比如星三角启动和直接启动。星三角启动时，定子电压为 AC220V，转子尚未转动，反电势为 0，定子和转子的电势差较大，故其启动冲击较大，启动电流也比较大；直接启动时，定子电压为 AC380V，转子尚未转动，反电势为 0，定子和转子的电势差最大，故其启动冲击非常大，启动电流也非常大。

反之，定子和转子的电势差越小，启动过程就越平稳，启动电流就越小，比如变频器的启动过程，详细分析见前文。

电机能量的传递，如果从转子传递到定子，电机就工作在“发电状态”或“电磁制动状态”。制动停机时间如果过短，变频器会报“过压故障”。

思考题 6. 一个定量泵泵站，变压器容量 $S_e=800\text{kVA}$ ，共 3 台水泵，每台水泵功率为 220KW。若 3 台泵均选用软启动器，是否正确？为什么？

答：三台泵如果均选用软启动器，则第三台泵带载启动不能成功。如果第三台泵需要带载启动，必须采用变频器。原因见思考题 5 的解答。

思考题 7：变频器整流环节不采用二极管，而采用晶闸管，其主电路会有什么不同？

答：变频器主回路结构见图 8-6。如果变频器整流环节采用了半控型晶闸管，则可控制其输出电压缓慢增加，故电容充电限流电阻 R1 和旁路该限流电阻的晶闸管 VT1 应取消。

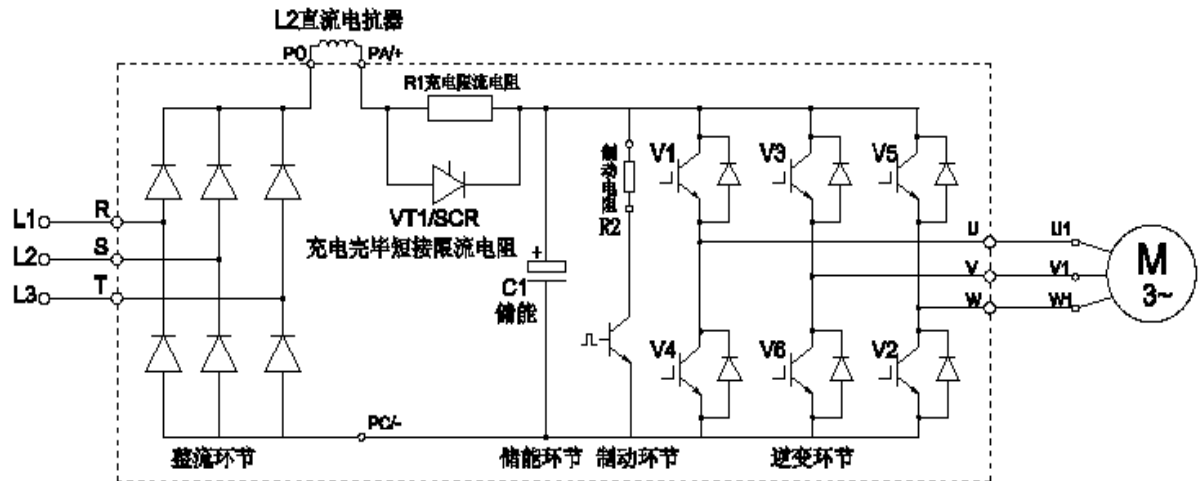


图 8-6 交-直-交型变频器的主回路原理图

思考题 8：电抗器（直流电抗器和交流电抗器）和无源滤波相比，减小谐波电流的能力为什么较差？

答：电抗器抑制谐波电流的原理是利用电流流经电感线圈不能突变的特性制成的，谐波电流流经电抗器后会变得比较平滑，但谐波电流仍在电网——变频器之间形成“谐波电流环”；另一方面电流流过电抗器后必然会产生压降，故电抗器线圈匝数不可能太多，电抗率一般为 3%~5%，否则会影响变频器输出转矩。故电抗器谐波抑制能力有限，一般情况下 $35\% < THDI < 45\%$ 。但无源滤波器利用电容吸收谐波电流，特定次数的谐波电流在无源滤波器——变频器之间形成环流，不再流入电网。所以无源滤波器滤除谐波电流的效果更好，可以将 THDI 降到 16% 或 10% 以下。

思考题 9：采用屏蔽电缆或铠装电缆后，电机电缆向周围空间辐射的能量减小了，但减小的这部分能量去哪里了呢？消失了吗？如果没有消失，那转换成了什么了呢？我们设计的时候又应该注意些什么呢？

答：由于变频器输出电压是矩形脉冲，会向空间辐射大量的电磁能量。变频器与电机之间的动力电缆（电机电缆）如果采用屏蔽电缆或铠装电缆，这些能量被屏蔽层或铠装层所阻挡，转换成热，所以电缆发热会很严重。如果电机电缆选用屏蔽电缆或铠装电缆，电缆截面积应适当选大。

思考题 10：进线电抗器和电机电抗器有什么联系？

答：进线电抗器和电机电抗器没有任何联系。

进线电抗器是变频器输入侧选件，安装在变频器输入侧，用来抑制谐波电流；而电机电抗器是变频器输出侧选件，安装在变频器输出侧，用来抑制变频器输出产生的 dv/dt ，以保护电机绝缘免受过高电压击穿。

思考题 11：无源滤波器和正弦滤波器有什么联系？

答：无源滤波器和正弦滤波器没有任何联系。

无源滤波器是变频器输入侧选件，安装在变频器输入侧，用来吸收变频器产生的谐波电流；无源滤波器吸收谐波电流的效果远好于电抗器，但价格也远高于电抗器。

正弦滤波器是变频器输出选件，安装在变频器输出侧，用来吸收变频器输出产生的 dv/dt ，以保护电机绝缘免受过高电压击穿。正弦滤波器抑制 dv/dt 的效果远好于电机电抗器，但价格也远高于电机电抗器。

思考题 12：为什么正弦滤波器的第二组电容必须接地，而无源滤波器的电容却不能接地？

答：正弦滤波器用于吸收过电压，所以第二组电容必须接地，这样过电压才会通过这组电容释放到大地，而不至于通过电缆叠加到电机端子。正弦滤波器电路结构见图 8-7。

无源滤波器用来吸收变频器产生的特定次数的谐波电流，这些特定次数的谐波电流在变频器和无源滤波器之间形成环流，不再流入电网。如果无源滤波器接地，则电源侧电流会通过无源滤波器直接流到大地，实际上就是三相电源短路，导致空开脱扣，无源滤波器被烧毁。无源滤波器电路结构见图 8-8。

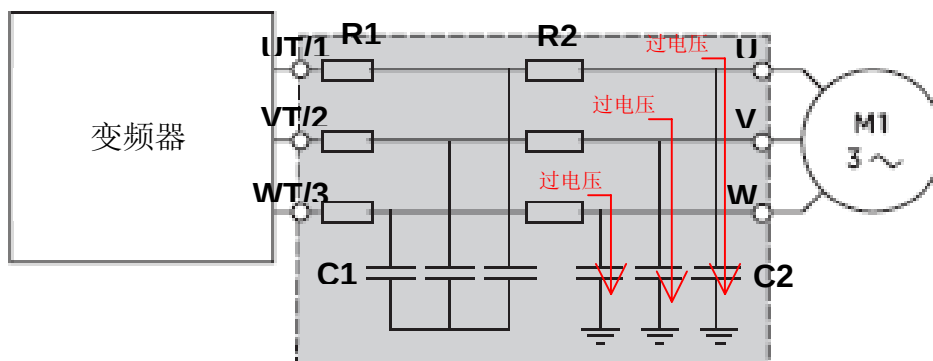


图 8-7 正弦滤波器吸收过电压

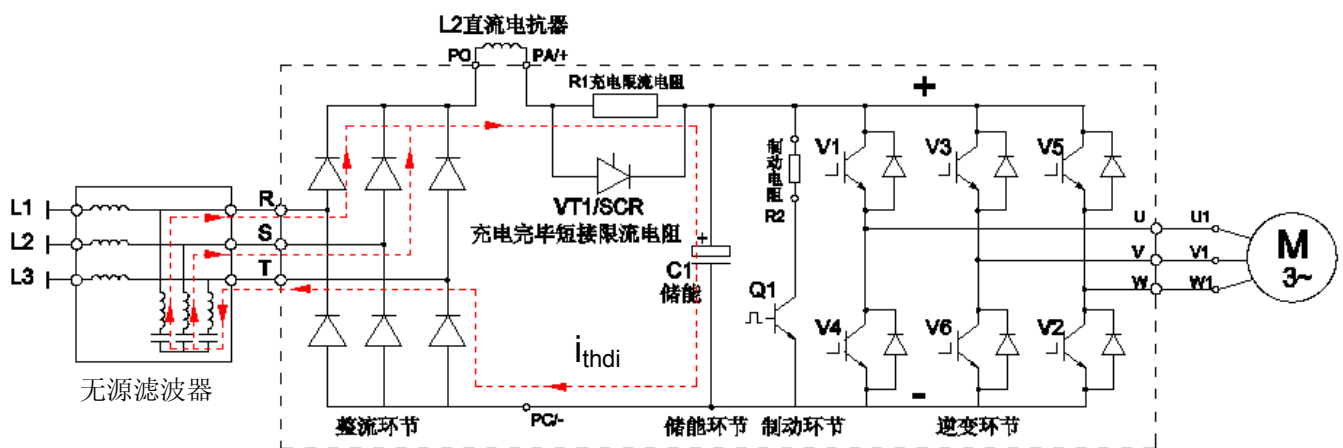


图 8-8 无源滤波器吸收谐波电流

思考题 13: 如果将正弦滤波器反接，即变频器端输出接到正弦滤波器的 U-V-W 端，而将电机电缆接到 UT/1-VT/2-WT/3，会造成什么后果？

答：正弦滤波器电路结构图见上一页图 8-7。电容组 C1 用于稳压，电容组 C2 用于将过电压释放到大地。如果反接，变频器三相输出对地短路，导致变频器和正弦滤波器被烧毁。

封底

(另作设计)

本书版权属于施耐德电气（中国）投资有限公司，未经作者本人同意，不得对本书内容以任何方式复制、摘录和修改。